

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica



**COMPARACION DE DOS HORMIGONES, UN
VIBRADO Y OTRO AUTOCOMPACTANTE.
MEDIANTE EL ESTUDIO DE SUS PROPIEDADES
REOLOGICAS, TECNOLOGICAS Y DE
DURABILIDAD.**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Germán Morón Sánchez

2011

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Máster en Técnicas y Sistemas de Edificación

TRABAJO FIN DE MÁSTER

COMPARACION DE DOS HORMIGONES, UN VIBRADO Y OTRO AUTOCOMPACTANTE. MEDIANTE EL ESTUDIO DE SUS PROPIEDADES REOLOGICAS, TECNOLOGICAS Y DE DURABILIDAD. COMPARATIVA CON HORMIGONES AUTOCOMPACTANTE CONFECCIONADO EN CENTRAL DE HORMIGONADO Y HORMIGON CONVENCIONAL VIBRADO.

Autor

Germán Morón Sánchez

Director/a o Directores/as

Mariano González Cortina

José Luis Piqueras Sala (UGR)

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

2011

Resumen

El trabajo que se presenta tiene como objetivo general estudiar los aspectos en los que se puedan vislumbrar diferencias entre las propiedades de dos hormigones, uno tradicional vibrado y otro con propiedades de autocompactabilidad, confeccionados y destinados para su uso comercial en condiciones y obras reales.

Para poder establecer las posibles diferencias se hace necesario respetar unos condicionantes iniciales, mantener constante la relación a/c y la cantidad de cemento en los dos hormigones objeto de estudio, el convencional puesto en obra mediante vibrado y el hormigón autocompactante, sin aporte de ningún tipo de energía complementaria. Variando únicamente aspectos relacionados con la dosificación de sus áridos afectando a la granulometría, tipo y cantidad de aditivos actualmente en uso.

Las diferencias de composición del HAC con los hormigones convencionales, sin duda, van a generar también diferencias en las propiedades de ambos en estado endurecido. La Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, en cuanto a los criterios de durabilidad, considera igual a estos hormigones que a los convencionales y establece las mismas prescripciones para garantizarla en ambos, aunque resulta evidente que puede haber diferencias sustanciales entre ellos.

Evidentemente, un estudio completo de la durabilidad de estos hormigones, planteado como se ha indicado y considerando no sólo los mecanismos de transporte sino los procesos de deterioro en su totalidad, resultaría extraordinariamente extenso y requeriría mucho tiempo para desarrollarlo así como la participación de numerosos colaboradores. Siendo éste un Trabajo Fin de Máster en el cual se presenta sólo una modesta aportación al mismo.

Abstract

The present research is intended to study general aspects that can discern differences between the properties of two concretes, one traditional and one with vibrating self-compacting properties manufactured and intended for commercial use and works in real life conditions.

To establish the differences is necessary to respect some initial conditions, maintain a constant ratio a / c and the amount of cement in the two concrete object of study, the conventional position in work by self-compacting concrete and vibrated without any input of any kind additional power. Aspects varying only the dosage of their arid affecting the particle size, type and amount of additives currently in use.

The differences in composition between the HAC and conventional concrete will doubtless also generate differences into the properties of both when hardened conditions apply. The Structural Concrete, EHE-08, consider in terms of sustainability criteria both self-compacting concrete and conventional concrete as equal and sets the same requirements for both. Although it is clear that there might be substantial differences between them.

It is clear that a deeper study of the durability of these concretes, raised as indicated and considering not only the transport mechanism but also the processes of deterioration, would be extremely lengthy and time consuming to develop and it would require the collaboration of many interested parties too. It should be clarified that being this Final Master Degree Project where the topic had to be mentioned, there is only a modest contribution to it, which could be extended further in time.

ESTRUCTURA INTERNA DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES RELACIONADA CON SU DURABILIDAD COMPARATIVA CON HORMIGONES AUTOCOMPACTANTE CONFECCIONADO EN CENTRAL DE HORMIGONADO Y HORMIGON CONVENCIONAL VIBRADO.

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	i
Abstract.....	iii
Índice general.....	v

CAPITULO 1: ESTADO DEL ARTE

1.1. Introducción.....	01
1.2. Componentes.....	04
1.2.1. Cemento.....	04
1.2.2. Agua.....	05
1.2.3. Áridos.....	05
1.2.3.1. Arena.....	06
1.2.3.2. Grava.....	06
1.2.4. Finos Adicionales.....	07
1.2.4.1. Filler.....	08
1.2.4.2. Ceniza volante.....	09
1.2.4.3. Humo de sílice.....	10
1.2.4.4. Escoria de alto horno.....	11
1.2.5. Aditivos.....	11
1.2.5.1. Superplastificantes.....	12
1.2.5.2. Viscosantes.....	14
1.3. Dosificación.....	15
1.3.1. Dosificación basada en referencias y tanteos.....	18

1.3.2.	Dosificación basada en métodos específicos.....	20
1.4.	Propiedades en estado fresco.....	22
1.4.1.	Métodos de caracterización de las prop. en estado fresco.....	28
1.5.	Propiedades en estado endurecido.....	37
1.5.1.	Resistencia a compresión.....	38
1.5.2.	Resistencia a tracción.....	41
1.5.3.	Módulo de deformación.....	42
1.5.4.	Retracción.....	44
1.5.5.	Fluencia.....	46
1.5.6.	Resistencia al fuego.....	48
1.6.	Durabilidad.....	49
1.6.1.	Agresividad ambiental.....	50
1.6.2.	Estructura interna del hormigón endurecido.....	51
1.6.2.1.	Áridos.....	51
1.6.2.2.	Pasta de cemento.....	52
1.6.2.3.	Zona de transición pasta-árido.....	59
1.6.3.	Carbonatación.....	61
1.6.4.	Corrosión de armaduras.....	65
1.6.5.	Durabilidad del hormigón autocompactante.....	66
1.7	Tipificación de los hormigones autocompactantes.....	72

CAPITULO 2: OBJETIVOS Y DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

CAPITULO 3: CARACTERIZACIÓN Y METODOLOGIA

3.1.	Características de los componentes.....	81
3.1.1.	Cemento.....	81
3.1.2.	Filler.....	81
3.1.3.	Áridos.....	82

3.1.3.1. Valoración de finos.....	83
3.1.3.2. Densidad y Absorción.....	86
3.1.4. Aditivo.....	88
3.2. Dosificación de los hormigones.....	88
3.2.1. Dosificación del autocompactante.....	89
3.2.2. Dosificación del convencional.....	90
3.3. Caracterización de las propiedades del hormigón en estado fresco.....	92
3.3.1. Métodos y criterios de evaluación.....	93
3.4. Resistencia a compresión.....	99
3.5. Determinación de porosidad.....	104
3.5.1. Porosidad total.....	104
3.5.1.1. Determinación de la densidad real.....	105
3.5.1.2. Determinación de la densidad aparente.....	108
3.5.2. Determinación de la desorción.....	109
3.5.3. Determinación de la permeabilidad por agua a presión.	110
3.6. Carbonatación.....	114
3.6.1. Descripción de la cámara de CO ₂	115
3.6.2. Plazos y técnicas de medida.....	117

CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de los hormigones estudiados.....	119
4.2. Densidad y Porosidad.....	122
4.2.1. Densidades.....	122
4.2.2. Porosidad.....	124
4.3. Penetración de agua a presión.....	125
4.4. Resistencias.....	126
4.5. Velocidad de propagación de ondas ultrasónicas.....	127
4.6. Carbonatación.....	128

CAPITULO 5: CONCLUSIONES

CAPITULO 6: FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

TABLAS Y FIGURAS

ANEJO



CAPITULO 1

ESTADO DEL ARTE

1.1.INTRODUCCIÓN

Los HAC poseen unas características reológicas que difieren de las del hormigón convencional debidos al aporte de una mayor cantidad de finos y de aditivo. En ese tipo de hormigón sólo interesa modificar esas propiedades durante el proceso de ejecución sin perjuicio de sus propiedades finales. Parece confirmado su buen comportamiento para hacer frente a ambientes agresivos, incluida la protección de las armaduras, quizás debido a su mayor dosificación en materiales cementantes. En este sentido, se pronuncia la bibliografía consultada de los resultados obtenidos en distintos trabajos se puede ignorar que con la reducción de la cantidad y tamaño del árido hay posibilidad de afectar a otras características no deseables como el módulo de deformación, la retracción o la fluencia.

Mientras que las propiedades en estado fresco difieren en gran medida del hormigón convencional, su comportamiento en términos de resistencia, durabilidad y demás prestaciones en estado endurecido pueden considerarse similares a las de un hormigón convencional de igual relación a/c y elaborado con los mismos componentes.

La durabilidad de los hormigones para un tipo de ambiente concreto, se encuentra esencialmente condicionada por la porosidad capilar, y ésta a su vez, por la relación a/c. Hay que tener en cuenta que la porosidad capilar se ve influenciada por los efectos que se producen durante la puesta en obra, es decir, los posibles fenómenos de exudación y segregación, que normalmente aparecen como consecuencia de un exceso de vibrado, para el caso de los hormigones convencionales y, por una elevada fluidez en el caso de los HAC.

Se sabe ya de algunos aspectos diferenciadores de los HAC con los convencionales que previsiblemente pueden afectar a la durabilidad de los primeros. El elevado contenido de filler calizo, por ejemplo, que se suele emplear para incrementar el contenido de pasta sin tener que aumentar la dosis de cemento, puede hacer más sensible a estos hormigones ante riesgo

de ser atacados por sulfatos debido a la formación de taumasita expansiva.

Por otro lado, la mayor proporción de pasta y la menor cantidad y tamaño del árido grueso de los HAC también pueden tener efecto en su durabilidad, quizás en el sentido de mejorarla, debido principalmente a la influencia que pueden ejercer en los mecanismos de transporte, mediante los cuales se permite el acceso de sustancias al interior de la estructura del hormigón. El empleo de mayores dosis de aditivos superplastificantes también puede afectar a su durabilidad, aunque a estas sustancias sólo les correspondería la función de fluidificar la mezcla manteniendo los requerimientos de agua e incluso disminuyéndolos, a veces presentan el efecto secundario de introducir cantidades considerables de pequeñas burbujas de aire, que podrían tener consecuencias en la vida útil de estos hormigones.

Pero, por ser de reciente empleo, como mucho unas dos décadas, no existe suficiente experiencia que permita hacer previsiones bien contrastadas sobre su durabilidad y sería muy interesante conocer con fundamento si las mismas medidas que se recomiendan para salvaguardar la durabilidad de los hormigones convencionales serían suficientes para garantizar también la de los autocompactantes o, por el contrario, éstas deberían incrementarse.

Se han difundido algunas investigaciones relacionadas con la durabilidad de los HAC [11][12][13][14] y, desde luego, se pueden hacer estimaciones con relativa seguridad en diversas circunstancias, pero, en opinión compartida por algunos estudiosos de estos hormigones, todavía quedan bastantes aspectos que requieren una más profunda investigación.

Lo que menos se ha encontrado en la bibliografía son datos de su comportamiento deducidos de ensayos que simulen, con suficiente aproximación, las condiciones que se presentan en las estructuras reales [15] [16] [17]. Y es que, en su puesta en obra, pueden presentarse algunos fenómenos que podrían tener incidencia en su durabilidad. La elevada fluidez que poseen podría permitir ciertos niveles de sedimentación y quizás de

exudaciones al ponerlo en obra, efectos que tal vez no se pongan de manifiesto en la confección de las pequeñas probetas normalizadas con las que se suelen realizar los estudios, pero sí podrían presentarse en elementos constructivos de mayores dimensiones. También es cierto que la moderadamente alta viscosidad que deben poseer las mezclas de estos hormigones quizás permitiría evitar los riesgos de segregación más que en los convencionales. La mayor o menor extensión con la que se produzca la segregación y especialmente la exudación, va a tener una importante incidencia en la estructura de la zona de transición pasta-árido y, consecuentemente, en las propiedades relacionadas con la penetración de sustancias. Por tanto, la exudación es, sin duda, un proceso determinante de la durabilidad de los hormigones.

Pero esta influencia apenas si parece haberse tenido en cuenta, según la bibliografía consultada la inmensa mayoría de las investigaciones sobre la durabilidad de los HAC se hace siempre comparando uno o varios tipos de estos hormigones con algún hormigón convencional, pero casi nunca se considera la puesta en obra ya que las determinaciones se realizan sobre piezas de pequeñas dimensiones, donde las diferencias de exudación y de asentamiento entre el hormigón convencional y el autocompactante apenas si van a quedar de manifiesto. Resulta obligado, por tanto, intentar reproducir las circunstancias de puesta en obra, donde se pueden producir tales procesos, si se pretende estudiar realmente las diferencias de los HAC con otros hormigones más convencionales.



Fig. 01: Puente del Dragón (Sevilla)

1.2. COMPONENTES

Aunque los componentes del HAC pueden ser los mismos que los utilizados para el hormigón vibrado convencional; con la peculiaridad de que las proporciones de éstos varían significativamente para los HAC, caracterizándose por un mayor contenido en finos. Un contenido de árido grueso más reducido usando tamaños máximos de árido normalmente menores, y la incorporación de mayores cantidades de aditivos superplastificantes.

Los materiales componentes deben satisfacer las especificaciones de calidad prescritas en la Instrucción EHE-08.

1.2.1. CEMENTO

No existen requisitos específicos respecto al tipo de cemento y se pueden utilizar todos aquellos que la Instrucción EHE-08, siendo las mismas que se le exigen al hormigón vibrado convencional. A estas exigencias habrá que añadir que en la elección de la categoría del cemento también condicionará el valor de resistencia alcanzada y el tipo de exposición en las que se encontrarán las estructuras.

Es prácticamente obligado realizar ensayos de compatibilidad entre el cemento y el aditivo que se vaya a usar porque cada cemento puede interactuar de forma diferente con el aditivo que se emplee.

En general, se suelen usar cementos comunes, empleándose con mayor frecuencia el CEM I. Puede ser aconsejable utilizar cementos con adiciones para casos donde se necesite un mayor mantenimiento de la fluidez, gracias al efecto retardo, permitirá un periodo de trabajo largo. El contenido de cemento en el HAC oscila normalmente entre 250 y 450 kg/m³. Valores superiores pueden presentar problemas de retracciones por el excesivo calor de retracción.

1.2.2. AGUA

El agua de amasado en el HAC no precisa de unas características especiales salvo las prescripciones indicadas en la normativa vigente para el hormigón convencional. En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica. Cuando no se posean antecedentes de su utilización deberán analizarse las aguas y asegurarse que cumplen con los requisitos establecidos en el artículo 279 de la EHE-08 [01].

La importancia del contenido de agua radica en el valor de la relación agua/cemento, la cual es básica en la resistencia mecánica y durabilidad de los hormigones.

Normalmente el contenido usual de agua en los HAC se encuentra en el rango comprendido entre 150 y 210 l/m³. Otra relación importante en estos hormigones es la relación agua/finos, que deberá estar comprendida entre 0,85 y 1,10. Con valores inferiores a 0,85 los hormigones suelen tener un exceso de cohesión mientras que para aquellos hormigones con relación a/f mayor de 1,10 el riesgo de exudación es elevado [18].

Dado que las mezclas de HAC son más sensibles a la variación de agua que las mezclas de HV, la utilización de agentes modificadores de la viscosidad es muy efectiva cuando se supera el valor de 1,10 ya que compensan el exceso de agua gracias a su efecto cohesionante y actuando como elemento estabilizador.

1.2.3. ARIDOS

Los áridos empleados normalmente para la fabricación de hormigones vibrados convencionales se utilizan también para las realizar HAC.

Es preciso controlar los áridos de forma minuciosa y continuada determinando frecuentemente su contenido de humedad, su granulometría y, en especial, su contenido de finos para intentar producir un HAC de calidad constante. La absorción de agua no debe variar mucho entre diferentes suministros.

La forma de los áridos (coeficiente de forma e índice de lajas) se deberá tener en cuenta ya que afecta a la compacidad y al índice de huecos. Algunos métodos de formulación usan la porosidad de los áridos para determinar los volúmenes de pasta y mortero necesarios [02].

El árido triturado tiende a mejorar la resistencia, mientras que el árido rodado facilita el flujo a causa de su menor fricción interna.

1.2.3.1. Grava

Las partículas más gruesas gobiernan el paso del hormigón a través de estrechamientos, puesto que pueden formarse acumulaciones que lo bloqueen. Evidentemente, el riesgo de bloqueo aumenta considerablemente en estructuras fuertemente armadas [19].

Aunque no existen restricciones respecto a la naturaleza de los áridos, en cambio, sí existen limitaciones respecto al tamaño máximo del árido.

Respecto al tamaño, la EHE-08 en su Anejo 17 [01], establece que el tamaño máximo del árido se limite a 25 mm, siendo recomendables, en función de la disposición de las armaduras, tamaños comprendidos entre 12 mm y 20 mm.

En cuanto al coeficiente de forma, evidentemente interesa que sea lo más elevado posible para conseguir la autocompactabilidad de manera más fácil ya que, cuantos más esféricos sean los granos, el rozamiento entre partículas será menor, favoreciéndose a la fluidez y reduciendo los riesgos de bloqueo.

1.2.3.2. Arena

En el HAC el árido fino es el que gobierna, en gran medida, las características de autocompactabilidad del hormigón, ya que la habilidad de atravesar zonas fuertemente armadas se rige principalmente por el volumen de mortero y la proporción de árido grueso en la mezcla. Las partículas más finas

han de mantener la cohesión en la mezcla, evitando la segregación de la misma y arrastrar a las partículas más pesadas cuando el hormigón se pone en movimiento [01].

Al igual que para las gravas, no existe limitación respecto a la naturaleza de las arenas recomendándose evitar el empleo de arenas silíceas machacadas por su forma lajosa.

Se pueden emplear todas aquellas arenas que cumplan con las especificaciones que se establecen en la Instrucción EHE-08, debiendo prestar especial atención a la fracción menor de 0,125 mm, puesto que el volumen de partículas de este tamaño afecta enormemente a las propiedades de autocompactabilidad del hormigón. No es imprescindible que sea una arena con alta cantidad de finos debido a que, para obtener la autocompactabilidad, pueden añadirse partículas finas, fílleres o adiciones.

Evidentemente las arenas rodadas favorecen la trabajabilidad del hormigón debido a su menor relación superficie/volumen, mientras que las arenas de machaqueo, al incrementar la fricción de la mezcla, requiere menos proporción de finos, lo que implica tener que añadir más agua o aditivo superplastificante que con las primeras.

Un alto contenido de pasta en las mezclas de HAC ayuda a reducir las fricciones internas entre las partículas de arena, aunque una buena distribución del tamaño de partículas es también importante. Algunos técnicos recomiendan emplear mezclas de arenas para alcanzar una curva de áridos adecuada y esto ayuda a reducir el contenido de pasta.

1.2.4. FINOS ADICIONALES

La autocompactabilidad precisa una elevada cantidad de finos en la mezcla del hormigón fresco, entendiendo por finos a aquellos materiales constituidos por partículas con diámetro inferior a 125 μ m, incluido el cemento.

El aumento de la proporción de finos eleva la viscosidad del hormigón disminuyendo los riesgos de segregación.

Dado que la cantidad de finos que aportan la arena y la grava no suele ser suficiente, es necesario una incorporación de finos adicionales para conseguir la autocompactabilidad. Estos finos adicionales aumentan la capacidad de retener agua de la mezcla, debido a su elevada superficie específica, y también parece que pueden contribuir a que el hormigón presente tixotropía.

Los finos adicionales utilizados en la fabricación de HAC se pueden clasificar de acuerdo a su hidraulicidad, como se recoge en la tabla 01.

TIPO 1	Inertes o seminertes	- Filler mineral (piedra caliza, dolomía, etc.)
TIPO 2	Puzolanas	- Cenizas volantes conforme la EN 450 - Humo de sílice conforme la PNE-prEN 13263
	Hidráulicamente activas	- Escoria granulada de alto horno. No está contemplada en la EHE-08

Tabla 01: Clasificación de las adiciones utilizables en el HAC [02]

Cabe destacar que los materiales que a continuación se describen son un componente indispensable para la fabricación del HAC y que pueden utilizarse de forma conjunta para una misma mezcla o de forma independiente, según las características finales para la que se diseñe el hormigón.

1.2.4.1. Filler

Son áridos finos cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 mm, siendo adecuados aquellos fillers que provienen de los mismos áridos que cumplen las prescripciones especificadas en las normas.

Según la EHE-08, se recomienda para el caso de HAC que la cantidad

resultante de sumar el contenido de partículas de árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063 y la adición caliza, en su caso, del cemento no sea mayor de 250 kg/m^3 de HAC [01].

El filler de carbonato cálcico es el material más empleado en la fabricación de HAC. Se puede considerar un fino adicional de naturaleza inerte que mejora algunas de las propiedades del hormigón como la trabajabilidad y disminuye la exudación y la tendencia a agrietarse. Según un estudio realizado [05], este material aunque no reacciona químicamente con los otros componentes, actúa como catalizador en el proceso de hidratación. La finura de este material ofrece la ventaja de mejorar la uniformidad de la distribución del tamaño de partícula entre amasadas, dando un mayor control a la demanda de agua por lo que son especialmente adecuados para el HAC.

TAMAÑO DEL TAMIZ (mm)	% EN MASA QUE PASA
2	100
0,125	85 a 100
0,063	70 a 100

Tabla 02: Granulometría del filler según UNE-EN 12.620/ AC: 2004 y EHE-08

1.2.4.2. Ceniza volante

La ceniza volante está constituida por partículas esféricas de tamaño entre $1 \mu\text{m}$ y $100 \mu\text{m}$. Es un material bastante usado en la fabricación de autocompactante ya que mejora las propiedades reológicas de los HAC y permite sustituir parte del cemento.

Es un fino adicional de naturaleza activa que al reaccionar con el hidróxido cálcico colmata las zonas de transición y los poros, con el consiguiente aumento de las resistencias a mayor plazo, mejorando el comportamiento frente a cualquier sustancia que pueda penetrar en disolución o por difusión y, en definitiva, mejorando la impermeabilidad para conferir una mayor durabilidad a las estructuras.

En general, las cenizas ofrecen buenos resultados en aplicaciones donde no se demande elevada resistencia inicial y se requiera un elevado valor de la cohesión. Como consecuencia de ello, no será la mejor opción para el prefabricado, puesto que se requerirán valores de resistencia inicial elevados, siendo más aconsejable el uso de filler calizo.

El empleo de cenizas permite trabajar con cantidades de cemento más ajustadas debido a su puzolanidad pero debe asegurarse que la calidad de éstas sea apropiada. Cenizas con elevado contenido de residuo no quemado pueden provocar manchas negras en la superficie del hormigón ya que éstas, por diferencia de densidades y por la elevada fluidez del HAC, emergen con facilidad hacia la superficie no siendo, por tanto, adecuados para la confección de hormigones blancos.

1.2.4.3. Humo de sílice

El humo de sílice es un material puzolánico altamente reactivo. Está compuesto por partículas amorfas esféricas muy pequeños con diámetro entre 0,003 y 0,1 μm , lo que confiere una buena cohesión y aumenta la resistencia o lo segregación. No obstante, puede aumentar los problemas de endurecimiento rápido superficial. Esto puede crear juntas frías o defectos de superficie si hay interrupciones en el suministro de hormigón y también disminuir la calidad del acabado superficial. [02]

Por ser un material muy reactivo, pues incluye sílice puro en forma no cristalino y por el pequeño tamaño de sus partículas, hace que el pH del hormigón se reduzca al reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y en dosis elevadas existe el riesgo de despasivación de los armaduras afectando a la durabilidad de las estructuras. Lo EHE-08 permite pues, utilizar sólo hasta el 10 % del peso del cemento.

En principio, puede ser utilizado para cualquier tipo de aplicación y, a pesar de que ofrece buenos resultados, tiene además de lo ya mencionado, alguna otra limitación. Por ejemplo, su cantidad está limitada por motivos económicos y por su elevada demanda de agua; además, esta adición no es

suficiente para satisfacer la demanda de finos, a no ser que la cantidad de cemento sea elevada y se adicione mayor cantidad de aditivo superplastificante.

1.2.4.4. Escoria de alto horno

Las escorias son tipo de fino adicional con propiedades hidráulicas latentes que mantienen las resistencias mecánicas de los hormigones reduciendo el calor de hidratación cuando sustituyen a parte del cemento, al igual que ocurre con las cenizas volantes.

Se trata de un subproducto de la industria siderúrgica compuesto principalmente por silicatos y aluminosilicatos de calcio similares a los del cemento y de tamaño inferior a 45 μm , presentando ciertos niveles de hidraulicidad latente que contribuye al desarrollo de resistencias.

Aunque se emplean en la fabricación de cementos de tipo II, III o V, las escorias granuladas sólo están normalizadas como adición en algunos países europeos. Aunque en España la EHE-08 no las considere, se entiende que su empleo no estaría prohibido en el HAC.

Su efecto sobre las propiedades del hormigón se debe evaluar mediante ensayos previos pues elevadas proporciones de escoria granulada afectan al HAC, con bajos niveles de estabilidad y con problemas de control de la consistencia, mientras que su lento fraguado podría incrementar el riesgo de segregación. [03]

1.2.5. ADITIVOS

Los aditivos químicos son un componente imprescindible del HAC pues sin su incorporación no sería factible su confección. El desarrollo de los HAC surge a raíz de los avances tecnológicos en el campo de los aditivos, lo que les convierte en uno de los componentes esenciales para conseguir la trabajabilidad adecuada de estos hormigones.

Para evitar la excesiva demanda de agua que precisaría la fabricación del HAC a causa del alto contenido en finos que provocaría una mezcla muy viscosa, se hace imprescindible el uso de aditivos superplastificantes de última generación. Sin ellos, la única forma posible de aumentar la fluidez tendría que ser incrementando la cantidad de agua, lo que generaría consecuencias negativas sobre la resistencia, la porosidad e, incluso, sobre la estabilidad del hormigón.

La elección del aditivo para la realización de una mezcla adecuada estará determinada por las propiedades físicas y químicas del cemento y de las adiciones. Éstas pueden tener efectos en factores como la finura, el contenido en carbono, los álcalis y el AC_3 [02].

Los aditivos más empleados son los superplastificantes, es decir, reductores de agua de alta actividad, que proporcionan una elevada capacidad reductora del agua en comparación con los superplastificantes tradicionales. A veces también se emplean en los HAC agentes modificadores de la viscosidad o cohesionantes, que aumentan la viscosidad y cohesión del material en estado fresco.

Eventualmente se pueden incorporar otra serie de aditivos, recogidos en la norma UNE-EN 934-2, como son los aditivos retenedores de agua, inclusores de aire, acelerantes o retardantes del fraguado. Al igual que ocurre en los hormigones convencionales, en el caso emplear más de un aditivo debe evaluarse la compatibilidad entre ellos.

La clave para obtener un buen HAC caracterizado por una elevada cohesión y con propiedades autocompactantes radica en la correcta optimización de la combinación de la dosificación de la grava, de la dosificación de los finos y de la dosificación de superplastificante.

1.2.5.1. Superplastificantes

Estos aditivos de nueva generación también se denominan reductores

de agua de alto rango ya que inducen una disminución del contenido de agua del hormigón de hasta el 40 %. Una mezcla típica de hormigón convencional sin reductores de agua contiene alrededor del 20 % de agua por volumen. La cantidad de agua necesaria para la hidratación del cemento es aproximadamente el 12 %, lo que significa que el 8 % restante del agua en la mezcla no reacciona con el cemento, pero es necesaria para conseguir la trabajabilidad del hormigón. El volumen de agua que no reacciona con el cemento se encuentra en espacios capilares conformando redes de poros capilares en el hormigón endurecido. Esta porosidad del hormigón reduce su resistencia, impermeabilidad y durabilidad.

En los hormigones sin fluidificantes las partículas de cemento al mezclarse con el agua no se dispersan totalmente, sino que tienden a formar flóculos que retienen el agua en su interior, haciendo menos trabajables las mezclas y necesitando usar ese exceso de agua para el amasado.

Mientras que los tradicionales aditivos fluidificantes basan su efecto dispersante únicamente en una fuerza eléctrica repulsiva, con la inclusión de los aditivos superplastificantes de tercera generación es posible de flocular las partículas de cemento también mediante la adsorción de sus moléculas sobre la superficie del cemento y posterior generación de una fuerza repulsiva de carácter mayoritariamente estérico que mejora su dispersión en la solución acuosa (Figura 02) [53]. Como consecuencia de ello, el agua inicialmente atrapada en los flóculos o aglomerados de partículas de cemento se libera aportando una mayor trabajabilidad del hormigón.

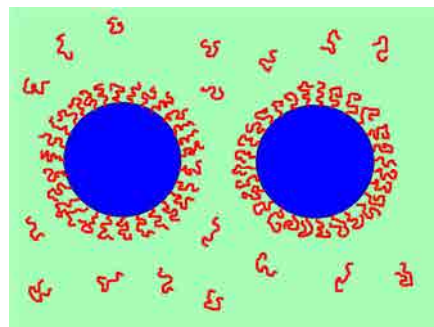


Fig. 02: Efecto estérico de los superplastificantes.

Por tanto, es recomendable, debido a las variaciones existentes de cementos y aditivos, realizar ensayos previos en pasta de cemento o mortero para la selección del tipo y dosis óptima de aditivo.

1.2.5.2. Viscosantes

Los HAC son muy sensibles a la variación de agua, por lo que es frecuente recurrir a agentes modificadores de la viscosidad cuando se supera el valor de 1,10 para compensar el exceso de agua los cuales, gracias al efecto cohesionante que producen, actúan como elementos estabilizadores.

Los agentes modificadores de viscosidad (AMV) son aditivos empleados para aumentar la cohesión o viscosidad de la mezcla manteniendo la fluidez.

La composición química de estos aditivos es muy variable. Son productos basados en polisacáridos o celulosa, solubles en agua, que mejoran la capacidad de retención de agua de la pasta reduciendo la tendencia a la segregación de la mezcla y limitando la pérdida de agua por exudación cuando está presente en cierto exceso [36].

A pesar de que estos aditivos no están contemplados en la normativa española actual, suelen usarse para minimizar el efecto de la variación del contenido de humedad, de finos en la arena o de su granulometría, haciendo que el hormigón sea más estable frente a estos cambios y menos sensible a las pequeñas variaciones en las proporciones de estos.

El rango de dosificación es muy variable dependiendo de la naturaleza del aditivo modificador de la viscosidad. Aunque su utilización en estos hormigones no es imprescindible, a veces se usan junto con los superplastificantes para obtener hormigones estables y de gran fluidez, si bien puede darse el caso de estos dos tipos de aditivos presenten cierta incompatibilidad como ocurre entre los agentes modificadores de la viscosidad de celulosa y los superplastificantes a base de naftalenos.

1.3.DOSIFICACIÓN

La composición del HAC requiere de una serie de requisitos especiales como son un alto volumen de pasta (finos y agua), un bajo volumen de áridos gruesos, un tamaño máximo de árido reducido, un baja relación agua/finos y el empleo de mayores cantidades de aditivos superplastificantes.

Todos estos componentes de la mezcla influyen en las características del hormigón y su diversidad en el mercado hace complicado establecer una dosificación definida para cualquier HAC. No obstante, el proceso de elaboración de HAC en las distintas dosificaciones consta de diferentes mezclas. En la Figura 03, se pueden observar unas proporciones típicas de los componentes de los HAC.

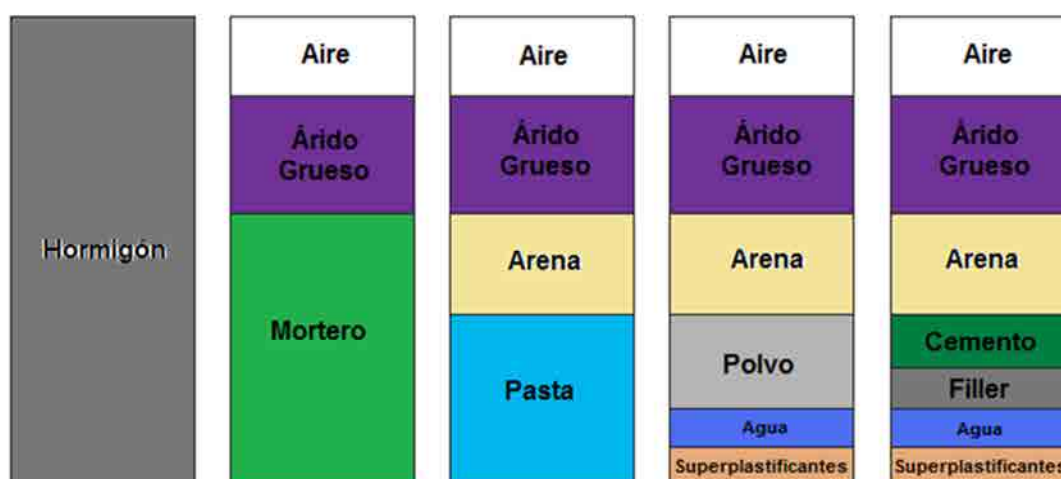


Fig. 03: Proporciones en volumen de los componentes del HAC.

En la actualidad se dispone de numerosos métodos de dosificación para la elaboración de HAC sin que exista un modelo universal aplicable a estos hormigones, sino que se proponen criterios de dosificación que pueden guiarse, bien, por referencias generales para posteriormente fijar las proporciones definitivas mediante tanteos con ensayos de laboratorio o, bien, se siguen métodos de dosificación concretos para aproximar las dosificaciones.

Aunque la base de estos criterios de dosificación es totalmente empírica, todos parten de una misma idea: las propiedades de autocompactabilidad se

consiguen mediante una proporción de árido grueso y un volumen de mortero que permitan la existencia de un espacio suficiente entre los granos de árido de tal manera la pasta pueda envolverlos completamente minimizando así la fricción sin que se produzcan bloqueos en los pasos entre las armaduras.

Como ya se ha comentado, los primeros trabajos dirigidos en el desarrollo de los HAC se llevaron a cabo por Okamura y Ouchi [54]. La idea inicial de Okamura [55] para la obtención de la autocompactabilidad consiste en la limitación del contenido de árido grueso, cuyo consumo de energía de rozamiento es particularmente intenso, hasta unos niveles inferiores al del hormigón convencional, de manera que se evite el bloqueo de forma más efectiva. También se requiere una alta viscosidad en la pasta para evitar el bloqueo del árido grueso cuando el hormigón fluya a través de las armaduras (Figura 04).

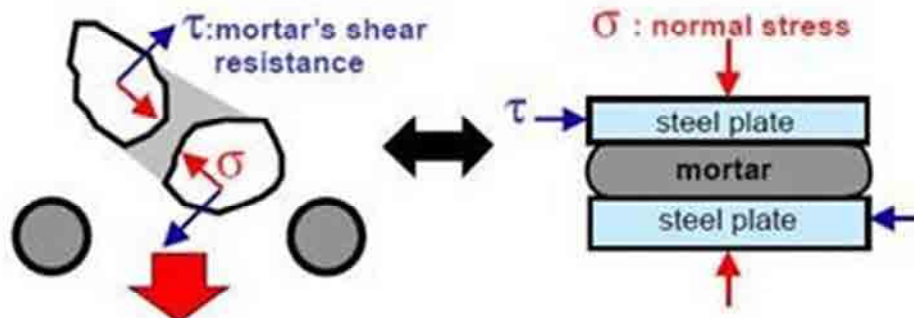


Fig. 04: Mecanismo para la obtención de la autocompactabilidad, según Okamura.

Una pasta con alta viscosidad previene, también, incrementos de tensión localizados debido a la proximidad entre las partículas de árido. Manteniendo una baja relación agua/finos es posible lograr una alta deformabilidad sólo con el empleo de superplastificantes.

En consecuencia, las proporciones de los componentes de HAC serán diferentes a los del hormigón de compactación convencional, cuya comparación se expone en la Figura 05.

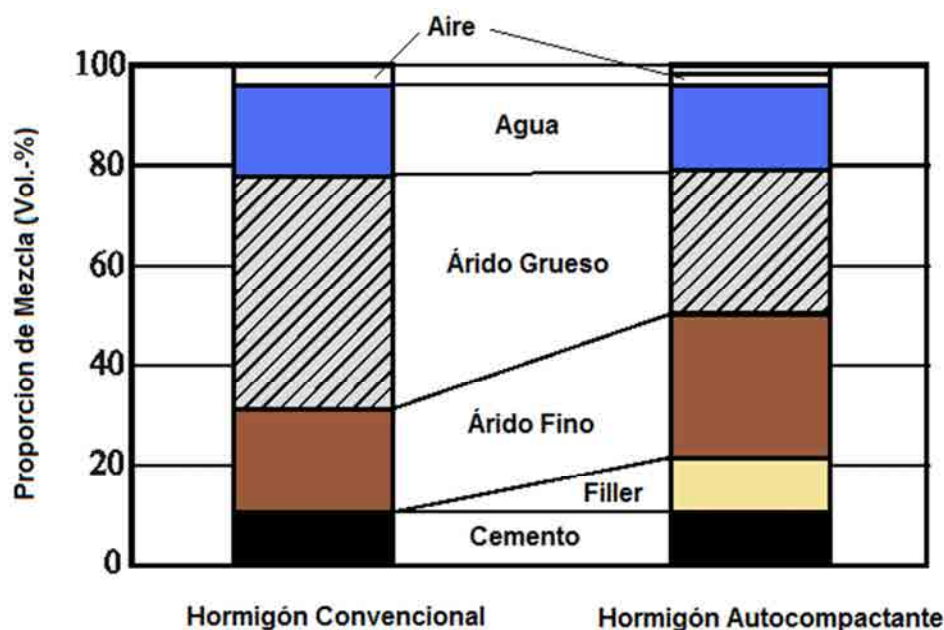


Fig. 05: Comparación de las proporciones entre el hormigón convencional y el HAC.

El método propuesto por Okamura considera al hormigón como un material de dos fases, árido grueso y mortero, y establece que la cantidad de los áridos gruesos sea igual al 50 % de su densidad de relleno y el contenido de arena al 40 % del volumen de mortero. Una vez establecido este volumen de arena se pueden determinar la relación agua/finos y la dosis de superplastificante.

Entre las razones que llevaron a establecer estos criterios se puede decir, por un lado, que cuando el volumen de árido grueso sobrepasa unos ciertos límites, las posibilidades de contacto entre las partículas de menor tamaño se incrementan drásticamente, entrelazándose y aumentando el riesgo bloqueo. Por otra parte, una alta relación agua/finos no sólo causa segregación sino que, además, provoca una excesiva reducción de la viscosidad. Contrariamente, una baja relación agua/finos da lugar a una alta viscosidad dificultando el paso del hormigón a través de las armaduras. Estos efectos debidos a variaciones en la relación agua/finos son similares a las que ocurren con el uso de los superplastificantes [45]. A su vez, las propiedades de los finos empleados influyen en las características reológicas del hormigón.

1.3.1. DOSIFICACIÓN BASADA EN REFERENCIAS Y TANTEOS

Dentro de esta dosificación se encuentran las propuestas realizadas por las Directrices Europeas para el HAC [16] y las recomendaciones de la Instrucción EHE-08 [30].

A título orientativo, el EFNARC 2006 [16] indica los rangos típicos de los componentes del HAC por peso y volumen, tal y como se aprecia en la tabla 2. Estas proporciones no son en ningún caso restrictivas y muchas mezclas de HAC pueden encontrarse fuera de rango en uno o más componentes.

Parámetros de dosificación	Rango típico por peso (kg/m ³)	Rango típico por volumen (litros/m ³)
Finos	300 - 600	
Pasta		300 - 380
Agua	150 - 210	150 - 210
Áridos Gruesos	750 - 1000	270 - 360
Áridos Finos (arenas)	El volumen de estos constituyentes es usualmente un 45 – 55 % del peso total de los áridos en dosificaciones equilibradas.	
Relación agua/finos por volumen		0.85 - 1.10

Tabla 3: Valores mínimos y máximos de los componentes del HAC según EFNARC.

La EHE-08 recoge unas dosificaciones comunes para todas las mezclas de HAC. Éstas deben poseer un contenido total de finos (cemento, adiciones y filler) en un rango de valores comprendido entre 450 y 600 kg/m³, un contenido de cemento en un intervalo de 250 a 500 kg/m³ y un volumen de pasta (agua, cemento, adiciones minerales activas, fílleres y aditivos) superior a 350 litros/m³ [43]. Esta Instrucción indica, sobre todo, los requisitos que a nivel individual deben satisfacer todos los componentes del HAC para la realización de un buen diseño de mezcla.

Respecto al contenido y tipo de cemento y a la cantidad de agua, la Instrucción no hace ninguna especificación sobre su limitación. Las dosis de estos componentes estarán supeditadas a la resistencia requerida y a las condiciones de exposición a la que se someterán las estructuras y responderán, por tanto, a las especificaciones indicadas al respecto en esta norma para el hormigón vibrado convencional.

En general, en el HAC es importante limitar el tamaño máximo del árido grueso, no debiendo superar los 25 mm, para favorecer, así, el paso de la mezcla entre las armaduras sin que se produzca bloqueo. Asimismo, es necesario limitar su contenido para conseguir las características adecuadas en estado fresco, por lo que el volumen de árido grueso resultará menor en el HAC que en el hormigón convencional, no superando generalmente el 50 % del árido total. De esta manera, la pasta envolverá adecuadamente los granos de árido grueso dotando de fluidez y movilidad a la mezcla.

Respecto a los aditivos, debido a la variedad existente en el mercado y a las características específicas que poseen, se hace difícil determinar el tipo y la dosis necesaria para diseñar las mezclas. Por ello, es necesario realizar pruebas para verificar qué aditivo confiere un mejor comportamiento a un HAC y para prever posibles incompatibilidades con el cemento y el filler.

Una vez tenido en cuenta estos aspectos, se selecciona la proporción de pasta en la mezcla, mediante amasadas de prueba, en las que se realizan ensayos como el escurrimiento, embudo en V y caja en L, hasta obtener los valores deseados.

1.3.2. DOSIFICACIÓN BASADA EN MÉTODOS ESPECÍFICOS.

Como ya se ha indicado anteriormente, la base de todos los métodos es esencialmente empírica y también todos distinguen una dosificación por etapas, en la que hay que optimizar en primer lugar, el volumen de pasta y de mortero, para finalizarla con el estudio del esqueleto granular.

Entre los métodos más conocidos pueden citarse el de Okamura [42], el de la Universidad Politécnica de Catalunya [20], el recomendado por la JSCE (Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles) [31], el de LPCL (Laboratoire Central Des Ponts et Chussées) de Paris [52] y el CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute) [46]

A continuación, se expone las directrices principales contempladas de algunos de éstos métodos:

- Método Okamura, se basa en determinar la proporción de las dos fases generales que componen el hormigón: árido grueso y mortero. Se establece, por estudios experimentales previos, que el volumen aparente de los áridos gruesos sea de 50 % del volumen del hormigón y se calcula su peso por m³ de hormigón utilizando la densidad aparente del mismo. El volumen de mortero estará determinado por el volumen restante hasta completar el metro cubico. De este mortero se considera que el árido fino debe estar en torno al 40 %, considerando que la relación agua/finos estará en torno del 0,9 al 1,0 dependiendo de las propiedades de los finos. Finalmente, la relación a/c y la dosis de aditivos superplastificantes se obtienen mediante ensayos sobre morteros, midiendo la viscosidad a partir del ensayo de mini-slump y la fluidez a través del embudo en V para morteros.

En la tabla 04 se pueden observar los parámetros principales que resumen el método de dosificación de Okamura.

METODO DE DOSIFICACIÓN DE OKAMURA				
Contenido de aire	Volumen aparente de áridos gruesos	Volumen de árido fino	Relación a/c	Dosis de superplastificante
2 – 7 %	50 % del volumen sólido de hormigón	40 % del volumen de mortero	Mediante ensayos sobre el mortero	Mediante ensayos sobre el mortero
ENSAYOS SOBRE EL MORTERO				
	Se mide...		Valores recomendados	
Embudo en V	Tiempo de flujo		7 – 11 seg.	
Mini-Slump	Diámetro de la extensión final del mortero		24 – 26 cm.	

Tabla 04: Resumen del método de dosificación de Okamura

- El método de la UPC, se basa en la optimización independiente de la composición de la pasta y del esqueleto granular del árido. La pasta está constituida por cemento, filler, agua y superplastificante, mientras que el esqueleto granular es la relación óptima entre arena y grava que proporciona la máxima compacidad en seco y sin compactar. Una vez optimizadas estas mezclas por separado, se procede a su unión probando distintas proporciones hasta obtener la dosificación del hormigón que se buscaba.

En el esquema de la Figura 06 se puede visualizar el proceso que sigue este método para elaborar la dosificación del HAC.

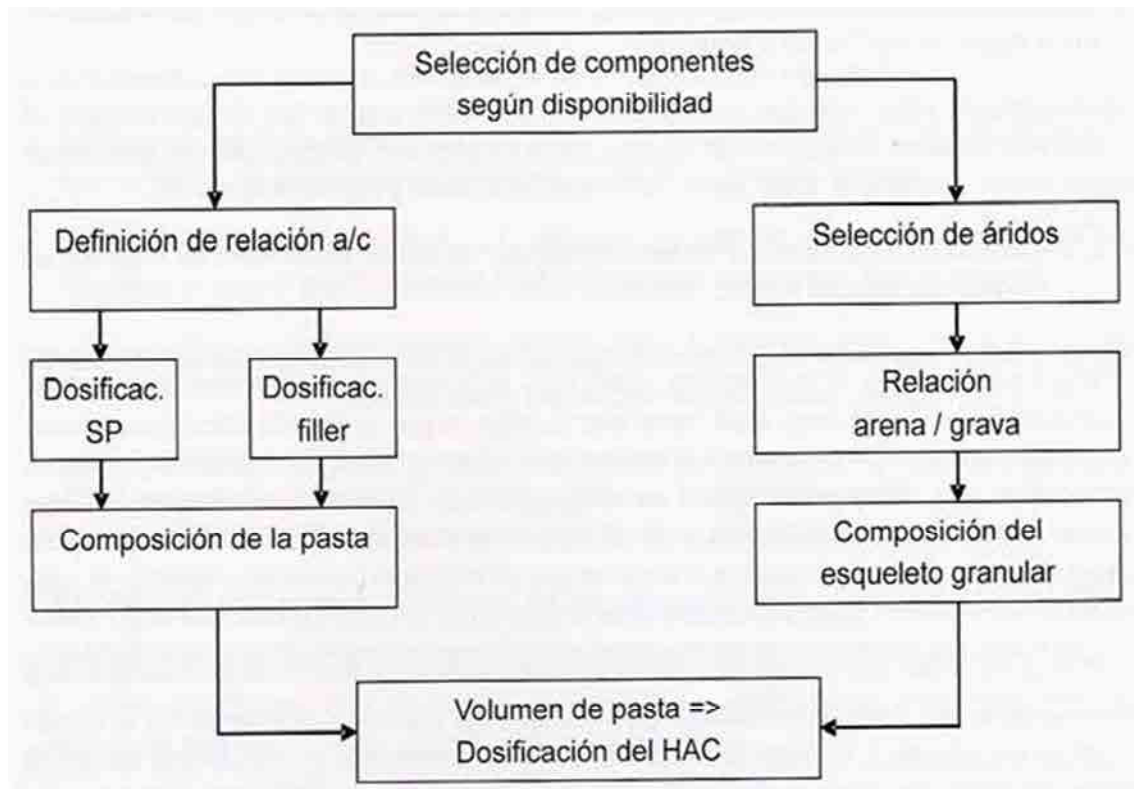


Fig. 06: Esquema del procedimiento de diseño de HAC según la UPC.

- El método del LCPC francés, propone un método mediante el cual se establece un esqueleto granular con mínimo de huecos o máximo empaquetamiento de áridos, desarrollándolo a través de una aplicación informática. La dosificación de finos se fija inicialmente de manera aproximada, en función de la resistencia y de los materiales. A continuación, con ayuda del cono de Marsh, se obtiene la dosis de superplastificante para cada una de las posibles dosificaciones de finos. Finalmente, deben ajustarse la cantidad de agua y aditivo de tal modo que la fluidez sea suficiente y la viscosidad aceptable.

1.4. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

El HAC se caracteriza por una mayor deformabilidad en estado fresco que los hormigones vibrados convencionales. La capacidad de relleno del encofrado, la resistencia a la segregación o estabilidad y la capacidad de paso entre las armaduras son, por tanto, las tres propiedades que un hormigón

fresco debe cumplir para que pueda ser calificado como autocompactante.

Esta mayor fluidez no debe llevar aparejado una segregación o exudación en la mezcla, debiéndose mantener siempre la homogeneidad de forma intrínseca como al someterse a la puesta en obra (paso a través de las armaduras, vertidos, etc). Esto es posible gracias a una cuidada dosificación que permita alcanzar las propiedades reológicas adecuadas para lograr un equilibrio entre fluidez y viscosidad.

Los estudios del hormigón fresco son de especial interés en el caso de los HAC ya que gran parte de sus propiedades finales dependen de las características de dicho estado. La evaluación de éstas se puede realizar mediante la medida de los parámetros reológicos o mediante la realización de ciertos ensayos tecnológicos.

Se entiende como reología el estudio de la deformación y flujo de los materiales vinculando las relaciones entre esfuerzo aplicado, deformaciones y tiempo.

Los fluidos con estructuras complejas, como es el caso del hormigón, presentan propiedades elásticas y viscosas. La mayoría de ellos se caracterizan reológicamente según el modelo de Bingham, que define el flujo del hormigón en términos de la tensión umbral y de la viscosidad plástica.

Se suele considerar que el hormigón fresco es una suspensión de partículas de árido en la pasta, con la consiguiente fricción entre ellas. Ésta fricción genera una tensión umbral o de inicio de flujo (τ_y) que ha de rebasar el material para que pueda fluir. Una vez vencida esta resistencia inicial, para aumentar la velocidad de flujo ($\dot{\gamma}$) debe aumentarse la tensión de flujo o tensión de fluencia (τ). La pendiente de esta recta ($\tan \alpha$) es la viscosidad (μ) y caracteriza la cohesión de la mezcla (Figura 07).

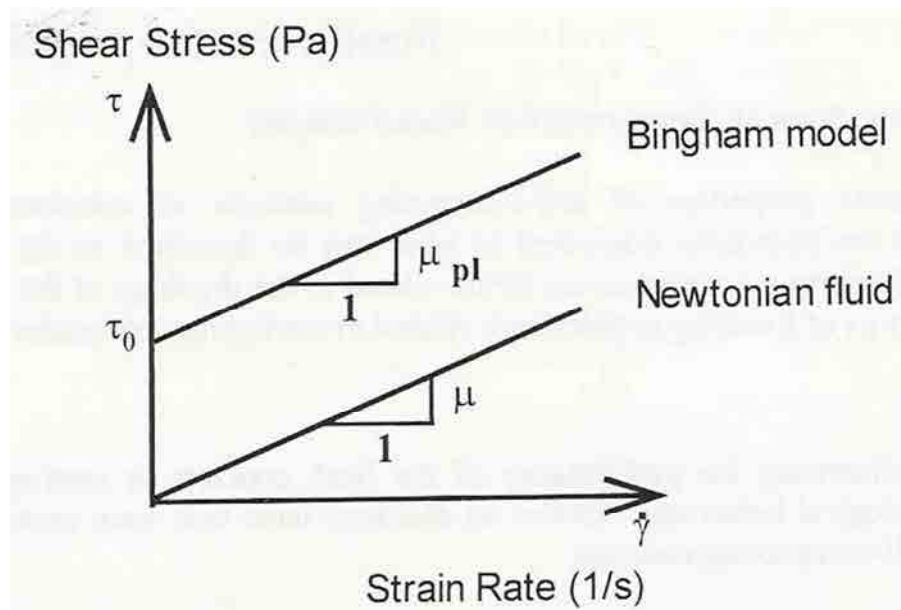


Fig. 07: Comportamiento reológico de un hormigón según el modelo de Bingham.

Según el modelo de Bingham, la expresión empleada para caracterizar la capacidad de flujo de suspensiones de este tipo es la siguiente:

$$\tau = \tau_y + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Donde,

τ es la tensión de flujo, tensión de fluencia o tensión de corte,

τ_y es la tensión umbral o tensión de inicio,

μ es la viscosidad, y

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación.

La tensión inicial de flujo se encuentra asociada a la fluidez, disminuyendo cuanto más fluido sea el hormigón. En cambio, la viscosidad se encuentra relacionada con la resistencia a la segregación o con la estabilidad del hormigón. La estabilidad es quizás la característica más directamente relacionada con la viscosidad aunque, en general, tanto las mezclas de baja viscosidad como las muy viscosas suelen ser sensibles a la segregación.

Estos parámetros del HAC (velocidad de deformación, tensión de corte y viscosidad) se ven influenciados por el contenido de agua, finos y aditivos

como se observa en la Figura 08.

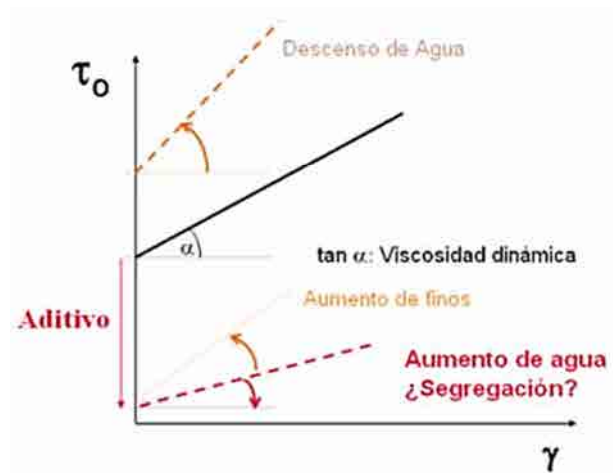


Fig. 08: Influencia del contenido de agua, finos y aditivos en el HAC

Comparando con HAC con un hormigón convencional con consistencia para ser vibrado y otro fluido, el primero presenta al inicio una tensión de flujo muy similar a la del tercero pero, a diferencia de éste en el que la viscosidad es menor que la de un hormigón convencional, la viscosidad del HAC es mayor incluso que la de los hormigones convencionales, lo que asegura su cohesión (Figura 09).

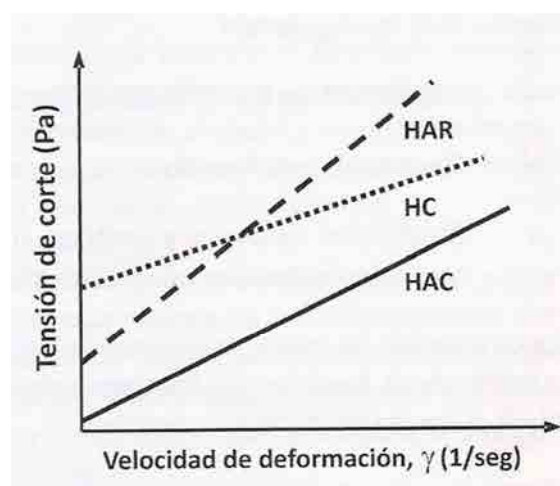


Fig. 09: Comparación de los parámetros reológicos entre el HAC, el HV y el hormigón fluido.

Sin embargo es necesario destacar que, aunque una baja tensión de inicio de flujo es un objetivo común en cualquier aplicación con HAC, la

viscosidad puede variar de forma considerable dependiendo de la técnica de producción y de la aplicación. En la Figura 10 se aprecia la relación existente entre la viscosidad plástica y la tensión de inicio de flujo para distintos hormigones en estado fresco.

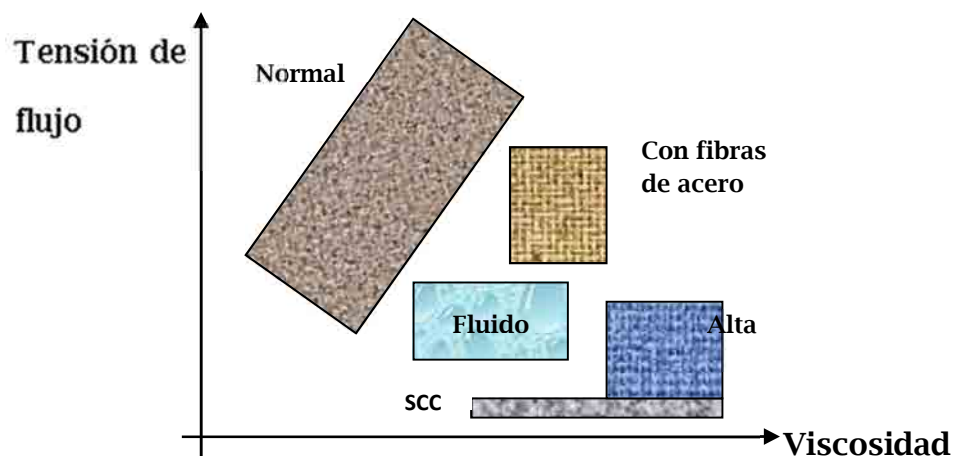


Fig. 10: Tensión de flujo frente a viscosidad para diferentes tipos de hormigones.

La compactabilidad de las mezclas de HAC mejora cuando disminuyen la tensión de fluencia y la viscosidad, pero también depende del tamaño de los granos más gruesos, es decir, del tamaño máximo del árido.

Domone [04], en un gráfico muy ilustrativo, indica la influencia de algunos factores en las dos propiedades reológicas del hormigón fresco, tensión de fluencia y viscosidad. (Figura 11)

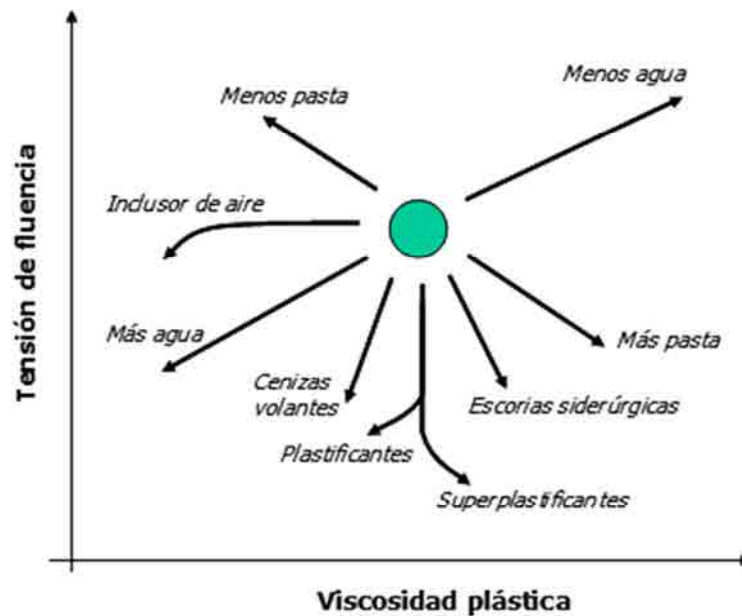


Fig. 11: Factores que influyen en la docilidad

Observando este grafico se puede deducir como actúan los diferentes materiales que conforman al HAC en su comportamiento reológico.

El factor que más influye para cualquier hormigón en la tensión de fluencia y viscosidad es, sin duda, la cantidad de agua empleada en el amasado. Al aumentar ésta, disminuye tanto la tensión de fluencia como la viscosidad de la masa en una proporción casi semejante. En ausencia de plastificantes, la elevada proporción de finos y el moderado contenido en agua por el que se caracterizan los HAC provocan una alta viscosidad a la vez que una alta tensión de fluencia, lo que dará lugar a mezclas muy cohesivas, siendo necesario el empleo de aditivos que garanticen la movilidad.

Por lo tanto, el siguiente factor por orden de importancia son los aditivos plastificantes y superplastificantes. Los aditivos hacen que disminuya la tensión de fluencia manteniendo prácticamente constante la viscosidad, aunque a dosis elevadas, como ocurre en el HAC, pueden aumentarla (como los superplastificantes).

La proporción de pasta de cemento hace que los dos parámetros reológicos que caracterizan al hormigón fresco se modifiquen en sentidos

opuestos: cuando aumenta la cantidad de pasta, disminuye la tensión de fluencia pero aumenta la viscosidad. Es un efecto muy interesante, si no fuera por los aspectos económicos y porque el cemento es el causante de las retracciones. Por lo tanto, debido al elevado contenido de pasta que poseen los autocompactantes obtendremos unos hormigones con una elevada docilidad. Lógicamente, las adiciones u otros finos del tamaño del cemento ejercen una influencia semejante a éste en cuanto a la mejora de la docilidad en general, es decir, mantienen la viscosidad disminuyendo la tensión de fluencia, aunque su efecto en la resistencia podría ser negativo por la demanda de agua que supone su presencia y, en consecuencia, por el aumento de la relación a/c, si no se agrega la proporción de cemento correspondiente, éste puede paliarse con el uso de superplastificante. Conviene indicar que la relación a/c no desempeña un papel claro en los parámetros reológicos del hormigón fresco ya que con cualquier valor, dentro de los límites usuales, es posible obtener la docilidad que se desee.

La granulometría del árido, la morfología y rugosidad superficiales de los granos son también factores influyentes de la docilidad de las mezclas de autocompactante, así como la forma de los granos. [05]

1.4.1. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

Para que un hormigón pueda definirse como autocompactante debe cumplir los siguientes requisitos durante todo el tiempo que dure su transporte y puesta en obra:

- Capacidad de relleno del encofrado sin ayuda
- Capacidad de paso entre las barras de armadura
- Resistencia a la segregación

La capacidad de relleno puede definirse como la facilidad para fluir y rellenar por completo todos los huecos existentes dentro del encofrado, bajo la acción exclusiva del peso propio del hormigón. Las armaduras deben quedar

perfectamente recubiertas y sin producirse coqueras. Esta capacidad está limitada por la fricción que generan las partículas gruesas ya que reducen la deformabilidad del hormigón.

La capacidad de paso, también llamada resistencia al bloqueo, es la capacidad del HAC para moverse a través de los obstáculos que suponen las armaduras y los encofrados sin que se produzca segregación. Esta propiedad del hormigón depende de la cantidad de armaduras, de su separación y del tamaño y forma de los áridos, ya que si éstos no son del tamaño apropiado se producen bloqueos que impiden un correcto flujo del hormigón.

La estabilidad o resistencia a la segregación es la capacidad del HAC de mantener su homogeneidad tanto durante el flujo como una vez en reposo; estabilidad dinámica y estática, respectivamente. Esto se obtiene dotando al hormigón de una viscosidad adecuada mediante una cantidad de finos considerable que hace que la mezcla se mantenga homogénea evitando la separación de sus componentes. Otra forma de alcanzar este objetivo es reduciendo el contenido de árido grueso, el tamaño máximo del árido y la relación agua/finos hasta determinados valores y, si no se dispone de suficiente proporción de finos, mediante el empleo de aditivos moduladores de la viscosidad.

Hasta ahora, no se ha encontrado un ensayo tecnológico fácil de realizar que permita caracterizar la completa autocompactabilidad de los HAC, por lo que es necesario recurrir a varios ensayos diferentes para evaluar las propiedades en estado fresco, necesitándose al menos dos tipos de ensayos para determinar esta característica [03]. La Tabla xx muestra los métodos utilizados para evaluar distintos aspectos de la autocompactabilidad de los HAC.

PRESTACIONES	ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA AUTOCOMPACTABILIDAD
CAPACIDAD DE PASO	Caja en L (L-Box)
	Escurrimiento con Anillo Japonés
	Caja en U
	Caja de relleno
CAPACIDAD DE RELLENO	Caja en L (L-Box)
	Extensión de escurrimiento
	Embudo en V
	Orimet
RESISTENCIA A LA SEGRAGACIÓN	Embudo en V a 5 min.
	Estabilidad GTM
	Tubo en U

Tabla 04. *Ensayos tecnológicos para caracterizar la autocompactabilidad*

A continuación se describen de manera somera los ensayos más habituales, pudiendo encontrar una descripción más detallada en la guía EFNARC 2002 [03].

Ensayo de escurrimiento

También llamado de extensión de flujo, está relacionado con la capacidad de relleno del hormigón. NO presenta indicaciones de la capacidad del hormigón para pasar por entre las armaduras si bloqueos, pero puede aportar indicios de la resistencia a la segregación. Es el ensayo más utilizado en obra debido a su simplicidad y a la fácil disponibilidad del equipamiento necesario para su realización.

Se utiliza una placa base marcada con un círculo de 500 mm de diámetro y, en ocasiones, con otro de 700 mm que sirve como referencia visual, además de un cono de Abrams (Fig. 12). El procedimiento consiste en llenar el cono con la mezcla y levantarlo verticalmente dejando que el hormigón fluya, para posteriormente, medir el diámetro final que alcanza la masa de hormigón extendido, así como el tiempo en que tarda en alcanzar el círculo

marcado en la placa T_{50} . Con estos datos se puede evaluar la fluidez del hormigón comparando los valores obtenidos con los recomendados o especificados, por ejemplo, en la EHE-08.

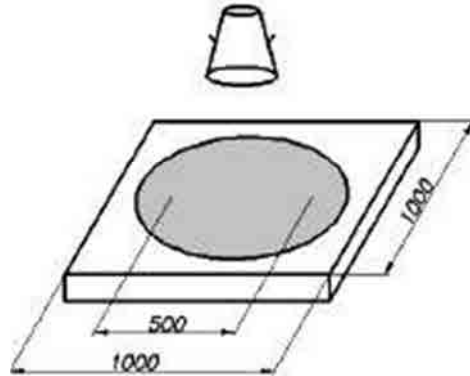


Fig. 12: Equipamiento del ensayo de extensión de flujo.

Ensayo de escurrimiento con anillo japonés

Este ensayo evalúa la fluidez y la capacidad de paso del hormigón a través de las barras de acero. Se realiza de la misma forma que el escurrimiento pero en este caso el flujo se ve afectado al interponer un anillo de acero con barras en su perímetro (Anillo J). Este anillo es de acero, con barras verticales roscadas en su perímetro.

El ensayo se desarrolla liberando la masa de hormigón del cono de Abrams en el centro del anillo. El parámetro fundamental que se obtiene es el diámetro final que alcanza la torta, aunque también se suele determinar el tiempo que tarda el escurrimiento en alcanzar la marca de 500 mm y las alturas de la torta donde se encuentra el anillo, en su parte exterior e interior. (Fig. 13)

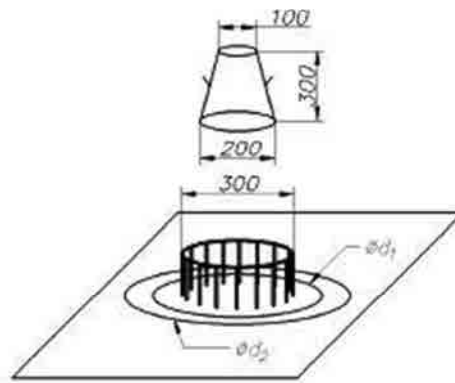


Fig. 13: Equipamiento de ensayo anillo japonés.

Ensayo del embudo en V

Este ensayo determina uno de los parámetros más importantes para evaluar la capacidad del hormigón para pasar por espacios estrechos.

Según el método de ensayo de la norma [22], se emplea un embudo en forma de V (Fig. 14) que se rellena sin compactación y determinando el tiempo necesario para que el hormigón fluya a través de una compuerta situada en la zona inferior.

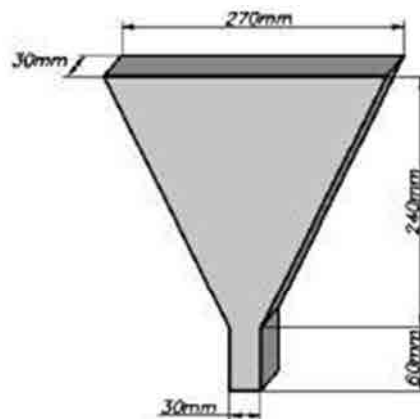


Fig. 14: Dimensiones del embudo en V

Aunque el ensayo está diseñado para medir la fluidez, el resultado se ve afectado por las propiedades del hormigón distintas a las del flujo. Debido a su forma, cualquier tendencia del hormigón a bloquearse se refleja en el resultado, como ocurre con un exceso de grava. De igual forma, el tiempo de vaciado

también se ve reducido por una alta viscosidad de la pasta y por una alta fricción entre las partículas.

Es posible establecer una correlación entre el ensayo de embudo en V y el ensayo de escurrimiento en función de los valores obtenidos para definir la zona de autocompactabilidad de los hormigones [35].

Ensayo de caja en L

Este ensayo está relacionado con la capacidad de fluir del hormigón y, también, con la medida en que está sujeto a bloqueos por parte del armado.

El equipo de ensayo [23] está formado por una caja en forma de L, con barras verticales de armado situadas en la unión de la parte horizontal con la vertical, separados por una compuerta, la cual inicialmente mantiene el hormigón en el contenedor vertical (Fig. 15)

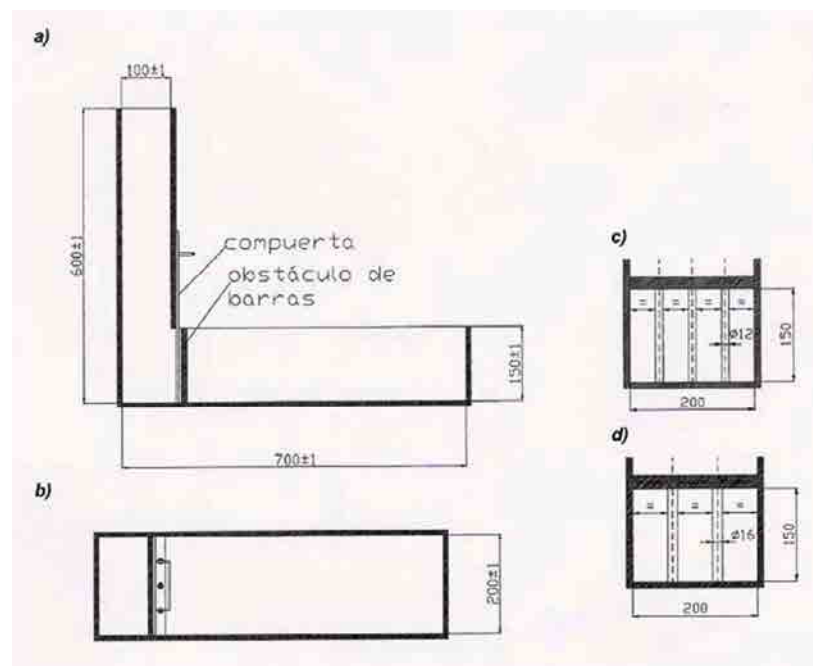


Fig. 15: Caja en L.

Tras la apertura de la compuerta, se mide el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar el extremo final del canal, T_{60} , cuando el movimiento ha cesado, se miden las alturas que alcanza el hormigón en la parte más externa

del compartimento vertical y en el extremo opuesto del canal horizontal. Con estos parámetros se obtiene información acerca de la capacidad de nivelación del hormigón y sobre el grado de restricción del paso del hormigón a través de las armaduras.

Ensayo del embudo en V a $T_{5\text{minutos}}$

El procedimiento es el mismo, pero se lleva acabo después de que el hormigón repose 5 minutos en el interior del embudo. La segregación que pueda producirse mostrará un flujo menos continuo del hormigón y un aumento en el tiempo de flujo.

Ensayo de la caja en U

Este ensayo se relaciona con la capacidad de relleno del HAC. El aparato utilizado consiste en un recipiente en forma de U con barras de acero intercaladas y separadas por una pared intermedia en dos compartimentos (Fig. 16).

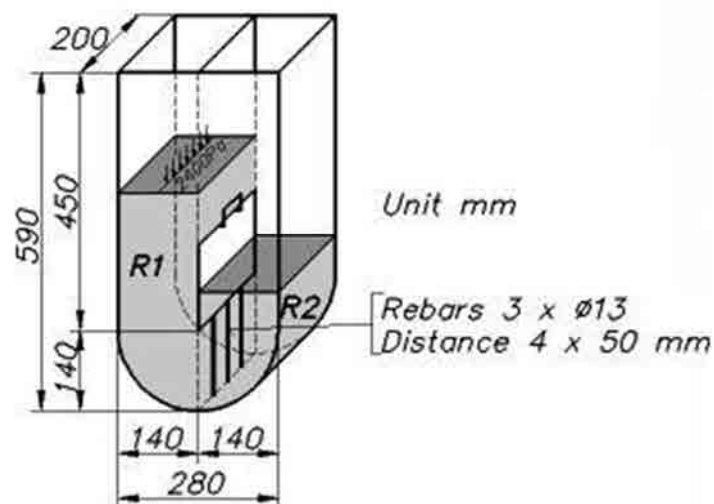


Fig.16: Equipamiento de ensayo caja en U.

El procedimiento consiste en verter el hormigón sólo en uno de los lados para que el otro fluya hacia arriba midiéndose la altura del hormigón en ambas secciones después de abrir la compuerta. Es evidente que cuanto menor sea la diferencia de altura mejor será la capacidad de relleno y de paso del hormigón.

Ensayo de la caja de relleno

Este ensayo también se encuentra relacionado con la capacidad de relleno del HAC cuando el tamaño máximo de áridos es de 20 mm. El aparato consiste en un recipiente de 35 barras horizontales que dificultan el llenado de la caja (Fig. 17).

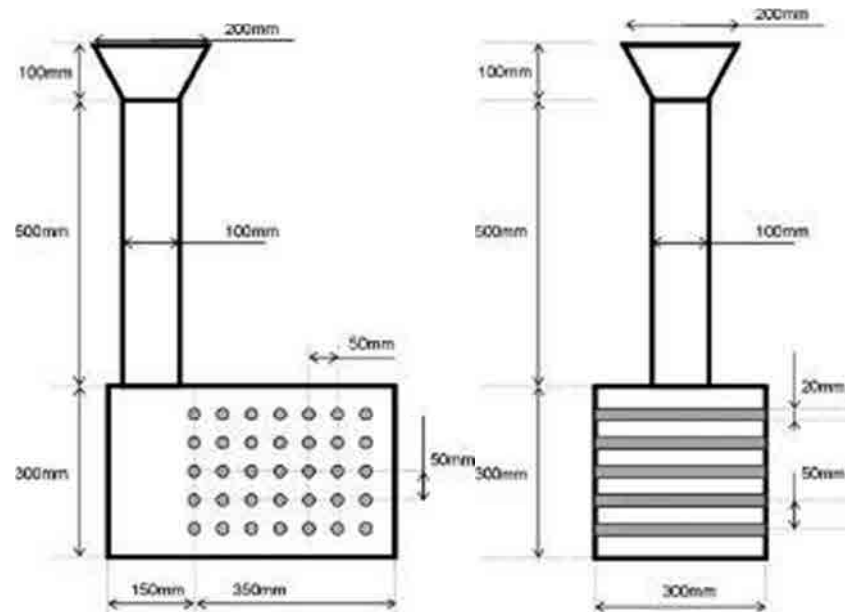


Fig. 17: Caja de relleno y dimensiones.

Al igual que otros ensayos, se mide la diferencia de altura en ambos lados de la caja, siendo un ensayo satisfactorio cuanto más cerca del 100 % se encuentre la altura de relleno.

Ensayo de estabilidad de tamiz (GMT)

Este ensayo evalúa la resistencia a la segregación. Después de que el hormigón haya reposado un cierto tiempo se vierte sobre un tamiz de 5 mm de la luz desde una cierta altura. La cantidad de mortero que pasa se encuentra relacionada con la cohesión del hormigón y por tanto con su resistencia a la segregación. Si el porcentaje que pasa es entre 5 y 15 % del peso de la muestra la resistencia a la segregación se considera satisfactoria, según los promotores de este ensayo.

Ensayo de Orimet

Se utiliza para evaluar mezclas de elevada fluidez siendo análogo al ensayo de embudo en V. Emplea un conducto de vertido vertical provisto de un orificio en forma de cono invertido, variable en el extremo inferior de descarga (Fig. 18). El parámetro que se mide es el tiempo necesario para que se descargue el hormigón contenido en él.

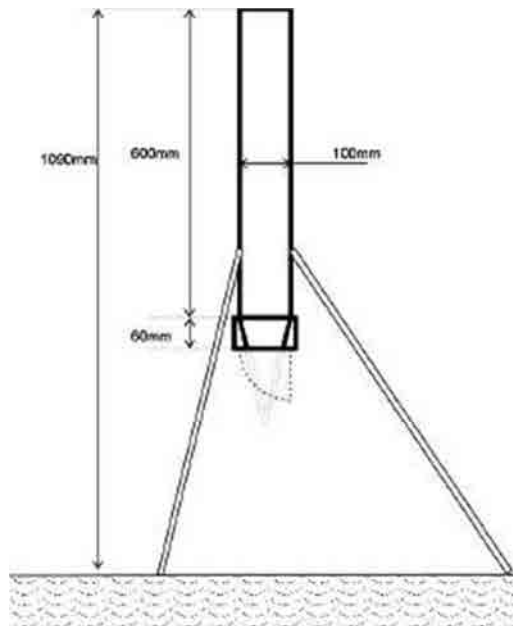


Fig. 18: Dimensiones del ensayo de Orimet.

Ensayo de tubo en U

Este ensayo caracteriza la resistencia a la segregación. El hormigón se hace fluir sin compactación por un tubo en forma de U, hasta que se detenga el flujo, según se muestra en la figura 19 Posteriormente se extrae el material de unas 10 secciones de espesor y se determina el contenido de árido grueso que poseen mediante el lavado y tamizado del mortero. La relación de segregación se obtiene como el cociente entre el menor y el mayor contenido de áridos gruesos de los diferentes discos, y este parámetro ha de ser mayor o igual a 0,90.

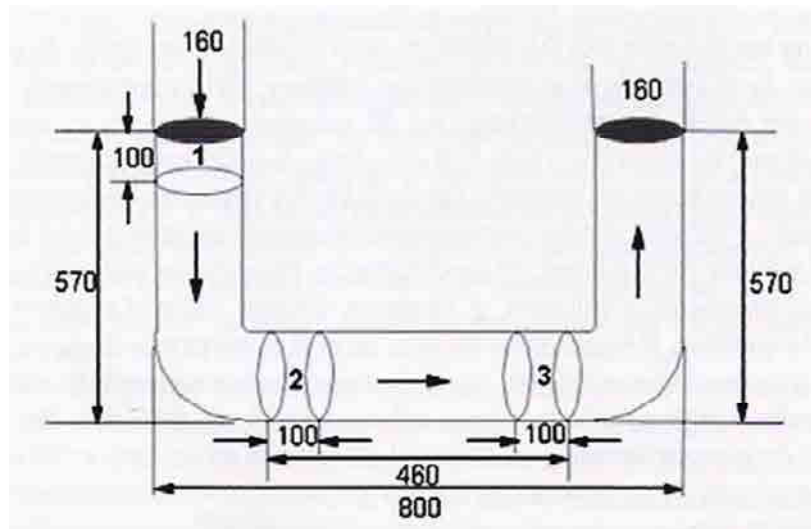


Fig. 19: Dimensiones del ensayo de tubo en U.

La EHE-08 es más permisiva que las directrices de EFNARC, ya que suprime algunos de los parámetros que se realizan en los ensayos para determinar la autocompactabilidad y amplía algo más el rango admisible de éstos. Tampoco especifica ningún tipo de ensayo para evaluar la resistencia a la segregación, sino que ésta puede apreciarse a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en V.

1.5. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

En el comportamiento en estado fresco es donde los HAC presentan sus mayores rasgos distintivos respecto a los hormigones vibrados convencionales. Según la EHE-08, se puede afirmar que el comportamiento en términos de resistencia, durabilidad y demás prestaciones en estado endurecido pueden considerarse similares al de un hormigón vibrado elaborado con los mismos componentes y relación a/c.

Por otra parte, la mayor densidad de la microestructura en los HAC así como la distribución más homogénea de los productos de la hidratación del cemento pueden inducir a que las propiedades de los HAC sean algo superiores respecto a los HV, para una misma relación a/c y materiales empleados [18].

Asimismo, hay que destacar que cuando se compara un HAC con un

hormigón convencional vibrado en estado endurecido, se suele hacer entre hormigones de resistencias similares. Por ello, la mayoría de las propiedades de los HAC en estado endurecido se pueden analizar aplicando las mismas formulaciones del hormigón convencional, sin que se requieran nuevos modelos de comportamiento para los HAC. Si bien es cierto que, debido a las mayores dosis de finos y aditivos que poseen los HAC, pueden existir pequeñas variaciones de las prestaciones en estado endurecido a edades tempranas, que deberán determinarse mediante los ensayos correspondientes.

A continuación se indican algunos aspectos de las propiedades fundamentales de estos hormigones.

1.5.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

Al igual que el resto de los hormigones, en los HAC la resistencia a compresión es una de las propiedades más importante del hormigón, donde la relación agua/cemento juega un papel decisivo. Según las Directrices Europeas del HAC, se puede afirmar que, para una HAC con una relación agua/cemento similar a la de un hormigón convencional, se tendrá normalmente un valor de resistencia a compresión ligeramente superior, debido a que la falta de vibrado provoca una mayor compacidad en la interfase entre el árido y la pasta endurecida.

Sin embargo, en los HAC influyen también otros factores como son una microestructura más densa, el menor tamaño del árido, la ausencia de vibración, el eventual empleo de adiciones activas o una baja relación agua/finos entre otros factores que permiten decir que la resistencia a compresión para una misma relación a/c suele ser mayor en un HAC respecto a uno convencional.

Otro de los posibles factores que pueden influir notablemente en el desarrollo de resistencias son los superplastificantes de tipo policarboxilato. Sin embargo, otros autores [36] hacen referencia a investigaciones en las que se

obtienen reducciones de las resistencias a compresión, especialmente a edades tempranas, cuando se incorporan a las mezclas medianas dosis de aditivos moduladores de la viscosidad, atribuyéndose este hecho posiblemente a la retención de agua que se produce por parte del aditivo, lo que provoca un retraso en la hidratación.

En la figura 20 se muestra la evolución temporal de la resistencia a compresión de HAC elaborados con distintas adiciones. Su comportamiento dependerá del uso de adiciones y de la dosificación de los aditivos empleados.

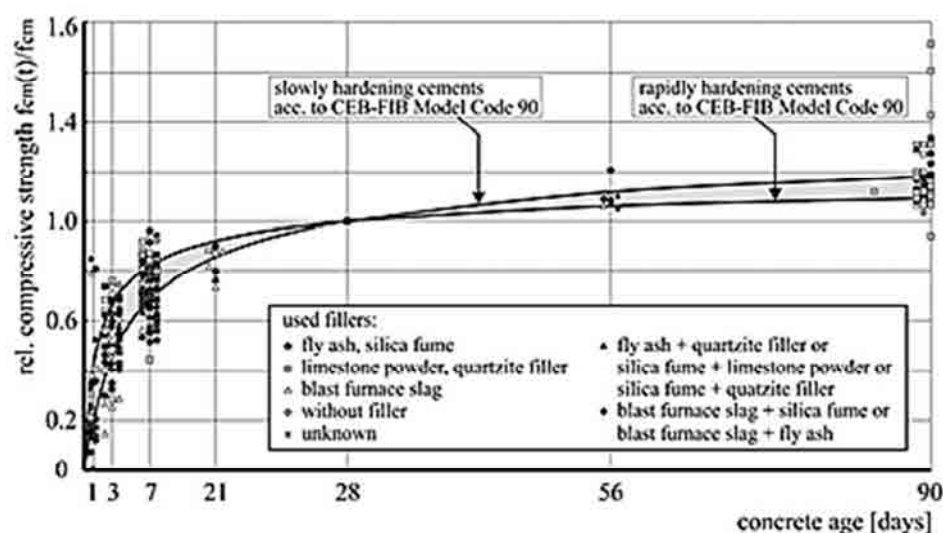


Fig. 20: Evolución de la resistencia a compresión relativa a los 28 días de diversos HAC.

El gráfico representa la evolución de la resistencia relativa a la compresión con la edad (respecto a la resistencia media a 28 días). La zona sombreada indica el rango de variación definido en el CEB-FIB Model Code 90 [37], para todo tipo de hormigones, donde se encuentran la mayoría de los datos obtenidos en los ensayos y que concuerdan también muy aceptablemente con los valores que ofrece la tabla 30.4.b de la Instrucción EHE-08 a este respecto.

Resultan destacables, las resistencias iniciales de los hormigones con filler calizo. Estudios específicos [38] concluyen que la adición caliza acelera el

desarrollo de la resistencia a compresión gracias a dos efectos combinados.

Mediante uno de ellos, las partículas de filler actúan a modo de núcleos que hacen precipitar el CSH disuelto; este efecto es pronunciado a edades tempranas pero resulta insignificante a 28 días. El segundo es el aglomerante, debido a la producción de carboaluminato en aquellos casos en los que el cemento contiene una cantidad importante de aluminato tricalcico.

El humo de sílice tiene un comportamiento puzolánico intenso y efectivo, iniciándose su acción puzolánica entre los 3 y 7 días, mientras que en los HAC, que incorporan cenizas volantes, los resultados de las reacciones puzolánicas son evidentes a edades más tardías.

En cuanto a la influencia de la relación agua/conglomerante en la evolución de la resistencia a compresión, algunas investigaciones concluyen que existe una proporcionalidad inversa entre la relación agua/conglomerante y el crecimiento que experimenta la resistencia a compresión conforme avanza la edad del hormigón, como se deduce de la Figura 21.

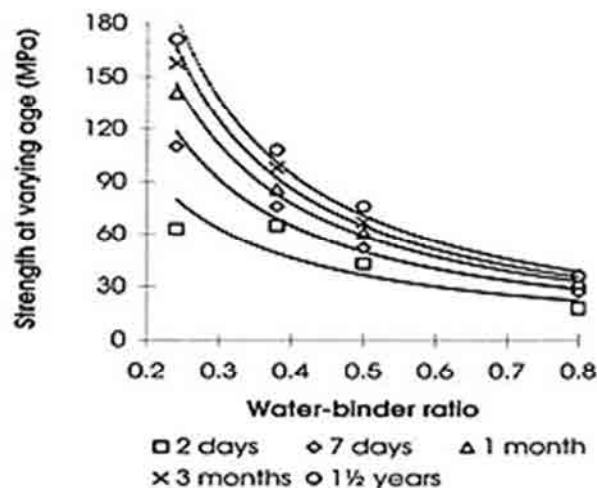


Fig. 21: Evolución de la resistencia a compresión en función de la relación agua/conglomerante de las mezclas de HAC.

Se aprecia de la Figura 21 cómo la resistencia crece en mayor grado con la edad cuanto menor es la dicha relación agua/conglomerante.

1.5.2. RESISTENCIA A TRACCIÓN

La resistencia a tracción está muy relacionada con la resistencia a compresión, de tal modo que un aumento de la resistencia a compresión conlleva un aumento de la resistencia a tracción indirecta pero la magnitud del incremento es menor.

En el hormigón convencional uno de los factores que influyen en la tracción indirecta es la adherencia entre el cemento y los áridos dentro de la zona de transición, pero en el HAC influyen también otros aspectos como la microestructura o el proceso de microfisuración.

Según algunos autores [39], la resistencia a tracción es ligeramente mayor en los HAC respecto a los hormigones convencionales. Sin embargo, las recomendaciones AFGC asumen que esta resistencia es equivalente en ambos hormigones.

La figura 22 ofrece información sobre la resistencia a tracción indirecta de los HAC de 15 a 85 N/mm² de resistencia media a compresión, con distintos tipos de fillers.

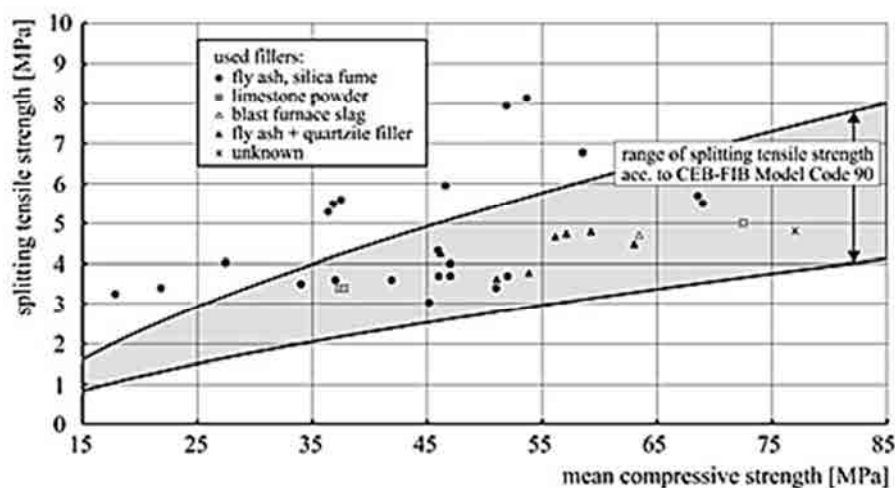


Fig. 22: Relación entre la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia media a compresión en el HAC.

1.5.3. MÓDULO DE DEFORMACIÓN

El módulo de deformación es una característica del hormigón relacionada con su rigidez. Normalmente, se considera la deformación del hormigón durante el tiempo de carga como deformación elástica instantánea y la deformación posterior debida a las cargas sostenidas como fluencia.

Considerando que el hormigón está formado por tres factores: árido, zona de transición y matriz de la pasta de cemento, el módulo de elasticidad dependerá de las características individuales de cada fase, de sus respectivas proporciones en la mezcla y de las características de la zona de transición.

Los módulos de elasticidad de la pasta y el árido son lineales y dependen de las características específicas de cada material. En general, el módulo de elasticidad del árido (60.000-100.000 MPa) es mayor y el de la pasta menor que el del hormigón (entre 6.000-25.000 MPa). (Fig. 23)

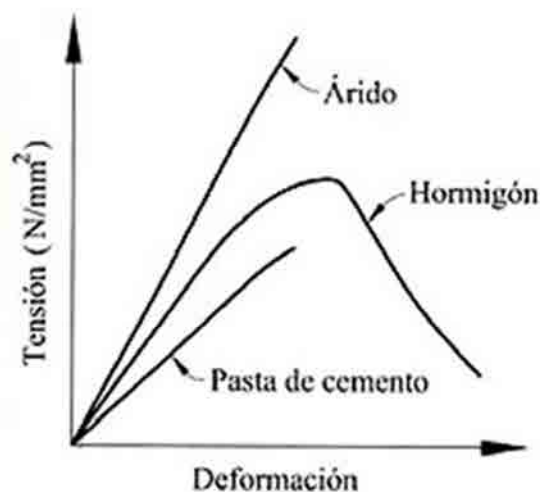


Fig. 23: Diagrama tensión deformación del árido, de la pasta y del hormigón.

El comportamiento no lineal del módulo de elasticidad del hormigón se debe en parte a la formación de microfisuras en la zona de transición entre el árido y la pasta y, a la fluencia si el proceso de carga es lento.

Se puede deducir, por ello, que el módulo de elasticidad del hormigón va

a depender de: el módulo de elasticidad de la pasta y del volumen de pasta en la mezcla, del módulo de elasticidad del árido y el volumen de árido en la mezcla y de la zona de transición entre el árido y la pasta.

Respecto al primero, el factor más influyente en el módulo de elasticidad de la pasta es la porosidad. La porosidad capilar depende directamente de la relación a/c , por lo que cuanto más alta es ésta, más alta es la porosidad y menor el módulo.

Aunque en el HAC el alto volumen de adiciones podría contribuir a aumentar el módulo de elasticidad de la pasta por el cierre de la porosidad, el aumento en el contenido de pasta en la mezcla tiene el efecto inverso, debido al bajo módulo que posee ésta, haciendo por tanto, que disminuya el módulo de elasticidad del hormigón.

Respecto al árido, las características que influyen sobre su módulo de elasticidad son: la porosidad, la granulometría y la morfología de los granos. Como es previsible, la disminución en la proporción de árido grueso en la mezcla contribuirá a la disminución del módulo de elasticidad del hormigón.

Finalmente, la zona de transición entre la pasta y el árido es un factor muy influyente en el módulo de elasticidad del hormigón. Esta zona suele ser la más débil del hormigón y es de la que dependen en gran medida las propiedades mecánicas y la durabilidad. La zona de transición contiene mayor volumen de poros capilares que el resto de la pasta, y es ahí donde empiezan a formarse las microfisuras del hormigón, que van creciendo con un aumento de la tensión aplicada. De ésta zona dependen en gran medida sus propiedades mecánicas y la durabilidad.

Por todo lo comentado anteriormente, la EHE-08 establece que: “los HAC contienen un mayor volumen de pasta que el hormigón de compactación convencional, y teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad de la pasta es menor que el de los áridos, se podría prever un módulo de deformación

ligeramente menor (entre un 7 % y un 15 %) para el caso del HAC.”

1.5.4. RETRACCIÓN

El volumen de los productos derivados de la hidratación del cemento es menor que la suma del volumen de cemento y de agua empleados. Ello provoca una disminución de volumen (tanto en sistemas saturados como en sistemas sellados) que no afecta al volumen aparente y que recibe el nombre de retracción química.

La magnitud de la retracción química progresa con el grado de hidratación del cemento, pero una vez que comienza el proceso de fraguado su desarrollo deja de ser libre y queda restringido por la estructura de la pasta y por los áridos, dando lugar a una fina porosidad a nivel de la microestructura de la pasta de cemento endurecida. A partir de ese momento, se genera la retracción hidráulica, que se define como la reducción de volumen aparente que experimentan los materiales cementicios cuando se hidratan después de iniciarse el fraguado.

Además de la retracción autógena, y con un desarrollo mucho más lento, se produce la retracción por secado, que implica intercambio hidráulico con el medio y depende, pues, de las condiciones ambientales, de la forma de la pieza y de otros factores externos.

En este aspecto, los HAC, gracias a su compacidad y escasa presencia de agua libre derivada de la baja relación agua/conglomerante experimentan, por lo general, menor retracción por secado.

También son condicionantes de la retracción por secado la temperatura y la humedad relativa del aire. Altas temperaturas o ambientes secos propician una mayor retracción.

Desgraciadamente, los estudios sobre retracción conllevan normalmente

grados de dispersión de resultados bastante amplios en todo tipo de hormigones pero, salvando esta circunstancia, el estado de conocimiento actual indica que no existen diferencias significativas entre las retracciones totales experimentadas por los HAC y los HV (Figura 23).

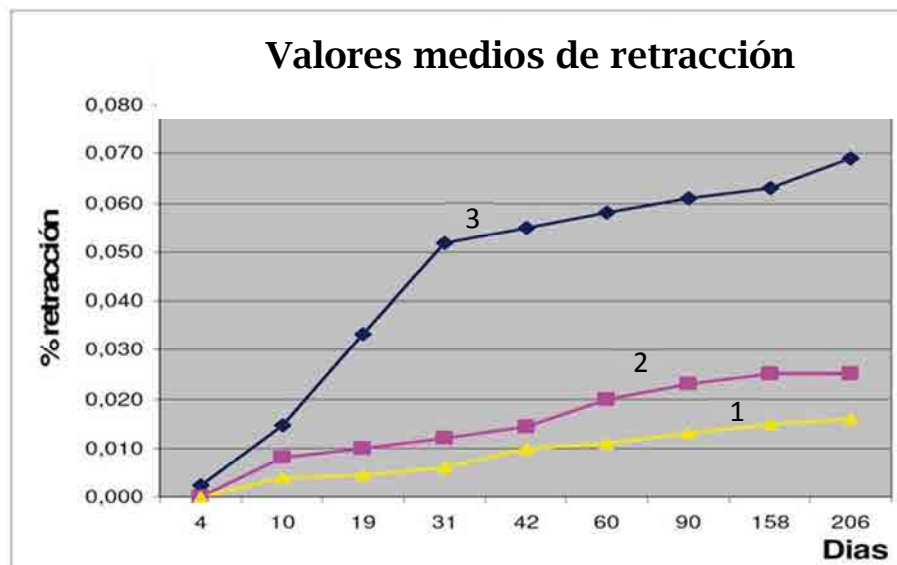


Figura 23: Retracción media de (1) HV; (2) HAC con reductor de retracción; (3) HAC.

La retracción autógena sirve para predecir la fisuración del material pues, como se ha comentado, las deformaciones que se producen en estado plástico no generan tensiones, y resulta indispensable que su medición comience cuando se inicia el fraguado. Valores por encima de 1 mm/m son indicativos de la propensión a este tipo de fisuración.

La magnitud y cinética de la retracción autógena aumentan al reducirse la relación agua/material cementicio (a/mc), pues crece el volumen de poros de menor diámetro y disminuye el volumen de agua disponible acelerándose el secado autógeno. Otra variable a tener en cuenta es la proporción volumétrica de árido, lógicamente aumentando ésta la retracción disminuye. En cuanto al tipo de cemento y las adiciones, se ha comprobado que contenidos bajos de C3A y C4AF, el empleo de cenizas volantes o de fíller calizo produce menor retracción. En sentido opuesto el empleo de escorias granuladas de horno alto finamente molidas o el humo de sílice aumentarán la retracción autógena [03].

De acuerdo con esas consideraciones, en los HAC es previsible que la retracción autógena sea más elevada, pues a una reducida relación a/mc unen el bajo contenido de árido y, eventualmente, el uso de escorias o humo de sílice. Algunas publicaciones cifran la retracción autógena del HAC en torno a un 10-50% superior a la del HV [15].

En los casos generales, el modo más sencillo y eficaz de controlar las variaciones dimensionales debidas a este fenómeno y reducir el riesgo de fisuración es la realización de un buen curado, conforme especifica la Instrucción EHE [01] para los hormigones tradicionales.

Existen investigaciones que no encuentran diferencias, con respecto a los modelos de cálculo, en la retracción calculada de estos hormigones y los hormigones normales, con lo cual es aplicable el mismo procedimiento. Hay que señalar que la estimación de la retracción normalmente conlleva unas consideraciones que hace que exista un grado de dispersión muy amplio para todo tipo de hormigones y, por lo tanto, no deben atribuirse los errores del modelo al diferente comportamiento de estos hormigones.

1.5.5. FLUENCIA

La fluencia es el incremento gradual de la deformación que se produce en el hormigón cuando se encuentra sometido a una tensión constante en función del tiempo. Es un proceso complejo y está relacionado con la retracción por lo que los factores que influyen en ambos fenómenos son similares.

Al aplicar una tensión sobre el hormigón, experimenta una deformación elástica instantánea y otra que creciendo con el tiempo; esta segunda deformación es la fluencia. Es difícil determinar exactamente la deformación elástica porque ésta depende de la velocidad de puesta en carga del hormigón. Esta deformación elástica disminuye conforme crece la edad del hormigón como resultado de un aumento en el módulo de elasticidad. La fluencia se calcula descontando la deformación elástica de la deformación total. Aunque la

deformación instantánea también incluye un componente plástico, lo común es designar la deformación durante la aplicación de la carga como elástica y las adicionales como fluencia (Figura 26).

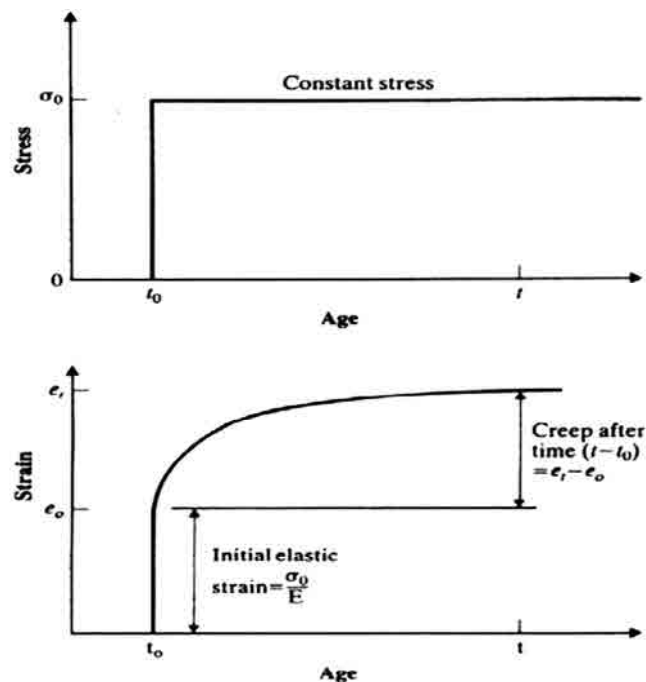


Fig. 24: Definición de la fluencia bajo tensión constante.

La dosificación de las mezclas puede incidir sobre la fluencia pero esto sólo ocurre en la pasta de cemento y en las zonas de la interfase pasta-árido mientras que la función del árido es retener estas deformaciones, por lo que un mayor contenido de áridos y un mayor módulo de elasticidad provocarán menores deformaciones por fluencia [47]. Debido a que en el HAC se reduce el volumen de árido grueso respecto al convencional y a que posee un mayor volumen de pasta de cemento, es de esperar que la fluencia en el primero sea superior a la del segundo.

Dado que la fluencia tiene lugar en la pasta de cemento y está influenciada por la porosidad, está directamente vinculada con la relación agua/cemento. Durante la hidratación, la porosidad de la pasta de cemento se reduce, por lo que la fluencia disminuye cuando la edad del hormigón aumenta.

Asimismo, los parámetros que mejoran la microestructura y reducen la

porosidad también disminuyen la fluencia, por lo que en mezclas con el mismo contenido de pasta, al disminuir la relación a/c también disminuye la fluencia. (Figura 25)

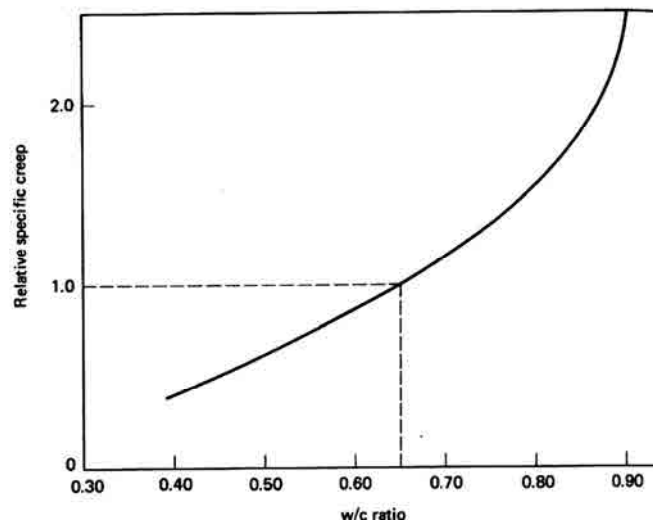


Fig. 25: Influencia de la relación agua/cemento en la fluencia.

En general, se considera la fluencia y la retracción como dos fenómenos relacionados [40]. Esto se debe a las similitudes entre los dos tipos de deformaciones: las curvas de desarrollo con la edad son semejantes, los factores que influyen son similares, y la magnitud es también equivalente. Ambos son fenómenos que ocurren en la pasta. El árido tiene la función de oponerse a dichas deformaciones.

Existen pocos estudios de investigación sobre la fluencia en el HAC.

Aunque podría decirse que, debido a la mayor proporción de pasta en el HAC los valores de las deformaciones por fluencia serán mayores. Si bien es cierto, este incremento puede verse compensado gracias a que la pasta que posee el HAC tiene una microestructura de poros más refinados y de una mayor calidad, que hacen que no se aprecien diferencias significativas.

1.5.6. RESISTENCIA AL FUEGO

El hormigón es incombustible y no propaga las llamas. No produce humos, gases tóxicos ni emisiones cuando está expuesto al fuego y no contribuye a la carga de fuego y tiene, además, una relación baja de

transferencia de calor.

En general, un HAC, debido a su mayor contenido en pasta y a su estructura más densa, será más propenso a sufrir un desconchamiento explosivo que un hormigón convencional vibrado. Pese a ello, la resistencia al fuego que poseen los HAC puede considerarse similar a la de los HC de igual resistencia y tipo de adición. [01]

1.6. DURABILIDAD

Hasta hace pocos años se había considerado que la resistencia del hormigón era el parámetro esencial para cuantificar su calidad y que alcanzando una resistencia adecuada se lograría también la durabilidad, aunque este aspecto realmente no era muy tenido en cuenta cuando se diseñaban. Como está ampliamente demostrado, para que una estructura de hormigón permanezca inalterable el tiempo necesario no será suficiente con conseguir una resistencia mecánica sino que, además deberán considerarse una serie de aspectos, aunque algunos de ellos estén también relacionados con las resistencias mecánicas.

La durabilidad depende en gran medida de los procesos de degradación, de naturaleza física o química, aunque prácticamente todos se producen por penetración de determinadas sustancias hacia el interior del hormigón. El proceso de transporte del agente agresivo es el aspecto fundamental y dependerá de la naturaleza de las sustancias que penetren, de su reactividad con alguno de los componentes y sobre todo, de la estructura porosa del hormigón. Para reducir la penetración de dichas sustancias y garantizar así la durabilidad, es esencial un control de la porosidad, o lo que es lo mismo, de la relación a/c y de todos los factores que la generan. Muchos especialistas han observado que la pérdida de durabilidad también puede deberse a una falla de compacidad de la capa más superficial, debido normalmente a las dificultades de vibración en zonas estrechas entre encofrados y barras de armado o en otros intersticios de las estructuras de hormigón armado.

Según la bibliografía revisada, desde el nacimiento del HAC se han realizado numerosas investigaciones, la mayoría de las cuales centradas en evaluar su comportamiento en estado fresco y los efectos que puede tener la diferente composición de estos hormigones en sus características reológicas y mecánicas, comparándolas con los hormigones vibrados tradicionales. En cambio, cuando se trata de evaluar la durabilidad de los HAC frente a la de los hormigones vibrados con la misma dosis de cemento y relación agua/cemento, el número de publicaciones se restringe, puesto que la mayoría de ellas se centran, como ya se ha dicho, en las características en estado fresco y en las resistencias.

Antes de realizar un análisis más detallado de los estudios referenciados en la bibliografía, quizás fuera necesario hacer un breve repaso de los principales factores de los que depende la durabilidad de las estructuras de hormigón. Los dos aspectos fundamentales que determinan los procesos de deterioro en las estructuras de hormigón son:

- La agresividad ambiental
- La estructura interna del hormigón, especialmente la del recubrimiento den el caso de estructuras de hormigón armado.

1.6.1. AGRESIVIDAD AMBIENTAL

Evidentemente el tipo de ambiente al que está sometido un elemento estructural puede llegar a provocar su degradación como consecuencia del tipo y contenido de sustancias agresivas que pueda aportar.

La Instrucción EHE-08 hace una clasificación especial de la agresividad de los ambientes en relación con la corrosión de armaduras. Debido a la importancia que debe prestarse a la durabilidad de las estructuras, esta norma prescribe que en la designación del hormigón se incluya, aunque no se trate de una característica propia del hormigón, la clase de exposición ambiental en la que va a quedar ubicada la estructura. De esta forma será más fácil tenerla presente y, por tanto, tomar las medidas oportunas para asegurar la durabilidad

necesaria. En la Tabla .., se ha recogido las clases de exposición ambiental relativas a la corrosión de las armaduras por causas diferentes.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	
no agresiva		I	Ninguno	-Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones. -Elementos de hormigón en masa
Normal	Humedad alta	Ila	Corrosión de origen diferente de los cloruros	-Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones. -Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. -Elementos enterrados o sumergidos.
	Humedad media	IIb	Corrosión de origen diferente de los cloruros	-Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm

Tabla 05: Clases generales de exposición relativas a la corrosión de armaduras.

1.6.2. ESTRUCTURA INTERNA DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Como ya se ha dicho, la durabilidad va a depender, además de la agresividad ambiental, de las características propias del hormigón.

La estructura del hormigón endurecido puede considerarse, a efectos de la durabilidad, formada por tres partes bien diferenciadas:

- El árido.
- La pasta de cemento hidratada.
- La zona de transición entre la pasta y el árido.

1.6.2.1. Áridos

Los áridos están presentes en el hormigón para contribuir a la estabilidad del volumen y, a veces, también a sus resistencias. Su naturaleza suele ser inorgánica con procedencia generalmente natural.

La fase de árido supone entre un 60 % del volumen total de la mezcla, en HAC, y un 80 % en hormigones convencionales.

En general, los áridos son minerales cristalinos de estructura densa, a través de los cuales la penetración de sustancias agresivas del exterior se encuentra muy dificultada. Salvo que los áridos sean porosos en gran medida, puede considerarse impermeables y, por tanto, no cabe considerarlos a efectos de la corrosión de las armaduras.

1.6.2.2. Pasta de cemento

La pasta de cemento comienza a formarse inmediatamente después de ponerse en contacto el agua y el cemento, cuando las partículas anhidras se dispersan en el medio acuoso. A medida que el proceso continúa, los productos de hidratación crecen en los espacios antes ocupados por el agua, con lo que la porosidad va disminuyendo.

Una vez que el proceso de hidratación ha finalizado se crea, normalmente, un sistema de poros en los espacios donde se encontraba el agua y no se han rellenado de sólidos. Esta porosidad del hormigón gobierna su grado de susceptibilidad en todos los procesos químicos, el cual tiene una influencia profunda sobre la durabilidad.

La pasta de cemento para cualquier tipo de hormigón puede considerarse constituida por una estructura compleja de sólidos, poros y agua.

Sólidos en la pasta de cemento

Las pastas de cemento hidratadas están fundamentalmente formadas por un conjunto de tres tipos de sólidos: silicatos cálcicos hidratados en forma de gel, CSH (gel de tobermorita), hidróxido cálcico, CH (portlandita) y aluminatos cálcicos hidratados (etringita, monosulfoaluminato y aluminato tricalcico hidratado)

El silicato cálcico hidratado (CSH), apenas presenta cristalinidad y posee una estructura fibrosa. Es el principal producto en la hidratación de los silicatos del cemento, formando una matriz que confiere al hormigón sus propiedades mecánico-resistentes, aun siendo un material frágil y muy poroso.

El hidróxido cálcico (CH), es un compuesto con una estequiometría definida, con forma de cristales hexagonales. Debido a su moderada solubilidad, tiene el gran efecto positivo de ser el responsable de permitir la formación de una película protectora sobre el acero de las armaduras, debido al elevado valor del pH que aporta al agua contenida en la porosidad de la pasta. Su moderada solubilidad en agua hace, también, que pueda lixivarse con relativa facilidad y, con ello, aumentar la porosidad de la pasta. Puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de yeso dando lugar a procesos de expansión y, en su presencia, la formación de etringita secundaria produce efectos más perjudiciales.

De los aluminatos cálcicos hidratados merece destacarse el aluminato tricalcico (C_3AH_6) por ser el responsable de la sensibilidad de la mayoría de los cementos al ataque por sulfatos, al formarse ettringita una vez que la pasta ha endurecido.

La etringita que se forma en los primeros momentos de la reacción con el agua, es decir, la etringita primaria, es una fase que se presenta con formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas largas, que forma un recubrimiento sobre los granos de cemento impidiendo la rápida hidratación que le conferiría el aluminato tricalcico; a eso se le atribuye la regulación del fraguado. Puesto que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado, algunos autores [41] afirman que le aporta a la pasta de cemento mayor cohesión en las primeras edades; se trata por tanto de una etringita positiva. En cambio, la que aparece por reacción con los sulfatos una vez que la pasta de cemento ya está endurecida, genera expansiones intolerables que producen su rotura.

En la formación de las fases que componen la pasta de cemento influye el tipo de cemento utilizado, ya que los distintos tipos pueden contener más o menos proporción de Clinker y diferentes clases de adiciones.

Poros

La microestructura del hormigón se caracteriza por su compleja y heterogénea red de poros más o menos interconectados. Determina en gran medida la intensidad con la que se desarrollarán las interacciones del hormigón con el ambiente que le rodea.

La porosidad más determinante para la durabilidad del hormigón es consecuencia del exceso de agua de amasado respecto a la estrictamente necesaria para la hidratación del cemento. La trabajabilidad necesaria del hormigón obliga a emplear relaciones a/c con exceso de agua, de manera que esta cantidad sobrante de agua ocupa unos espacios de volumen superior al de los productos de hidratación.

Respecto a la distribución de tamaño, los poros abarcan varios órdenes de magnitud, incluyendo cada uno en mayor o menor medida sobre el tipo y velocidad de los mecanismos de transporte y sobre los mecanismos de fijación en relación con el agua. Teniendo en cuenta que la superficie interna de los poros es mucho mayor que su superficie exterior en el hormigón, el campo de actuación de los agentes agresivos aumentará considerablemente con la disminución del tamaño de los poros [15].

La IUPAC clasifica los poros en microporos o poros de gel, mesoporos o capilares y macroporos o poros de aire. Estos dos últimos son los que suelen afectar a la durabilidad del hormigón y, especialmente, los mesoporos, que determinan el comportamiento permeable del hormigón por su mayor interconexión [42].

Una clasificación general de los poros que puede contener la pasta de cemento es la siguiente:

Los **poros de gel** o microporos son los espacios intersticiales interconectados presentes entre las partículas de gel. Son los más pequeños y pueden contener gran cantidad de agua adherida mediante enlaces de puentes de hidrogeno. Ocupan un 28 % aproximadamente del volumen total de gel, independientemente de la relación a/c y del grado de hidratación del cemento.

Los **poros capilares** o mesoporos constituyen el volumen ocupado inicialmente por el agua que no haya sido rellenado por los productos de la hidratación y se van reduciendo a medida que ésta avanza. Esta porosidad capilar depende, básicamente, de la relación a/c y del grado de hidratación alcanzado, es decir, del curado.

En la Fig. 26 puede observarse cómo para relaciones a/c superiores al 0.38 el volumen de gel ya no es suficiente para rellenar todos los espacios disponibles, por lo que quedarán poros capilares, incluso después de haberse completado el proceso de hidratación. Por tanto, en torno a una relación a 0.4, el volumen de poros capilares es prácticamente nulo, pero aumenta rápidamente cuando esta relación se eleva; por ejemplo, para una relación a/c de 0.7 los poros capilares ya ocupan más del 30 % del volumen de la pasta.

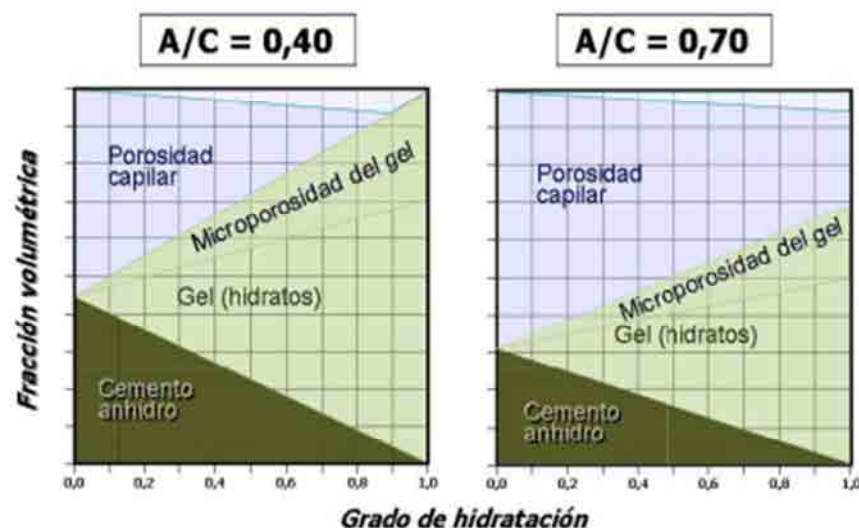


Fig. 26: Composición volumétrica de la pasta de cemento hidratada en función del grado de hidratación para dos relaciones a/c.

Con humedades relativas menores de alrededor del 75 %, el agua de amasado del hormigón se evapora con relativa facilidad, no permitiendo el progreso de la hidratación y, con ello, manteniendo una gran red de poros capilares, que aumentará la permeabilidad en la magnitud que se aprecia en la Figura 27. Por encima de ese valor los poros permanecen parcialmente llenos, ya que incluso el agua puede condensar en ellos y, a la vez, no se generan tensiones por retracción.

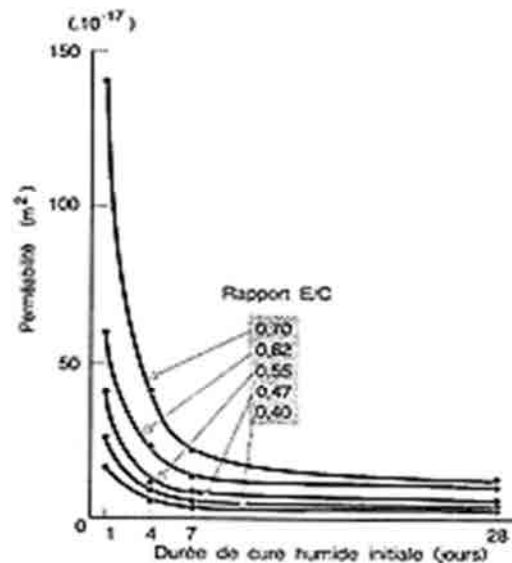


Fig. 27: Influencia en la permeabilidad en función de la relación a/c y el tiempo de curado.

Por tanto, es necesario realizar un curado correcto, es decir, ininterrumpido y con el aporte necesario de agua, para evitar la desecación del hormigón, especialmente durante las primeras edades del desarrollo de su hidratación, para evitar que la desecación favorezca la fisuración y con ello el consiguiente incremento de las vías de penetración de los agentes agresivos.

Puede decirse que los poros capilares forman una red, a veces interconectada, siendo los mayores responsables de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida

Los macroporos incluyen los **poros de aire** atrapado, son generalmente de forma esférica y se pueden dividir en dos tipos: los generados durante el amasado y la compactación y los poros de aire ocluido introducidos mediante

aditivos. Estos últimos tienen una gran importancia en la durabilidad del hormigón frente a ciclos de hielo-deshielo pues casi nunca están saturados de agua, provocando que la red de poros pueda poseer cavidades a modo de cámaras de expansión.

En la Figura 28 se muestra un esquema simplificado de la estructura porosa de la pasta de cemento hidratada. Los puntos negros representan las partículas de gel, los espacios intersticiales constituyen la porosidad propia del gel y los espacios marcados con “C” son los poros capilares. Los poros de aires no se ven representados en su totalidad por su gran tamaño.

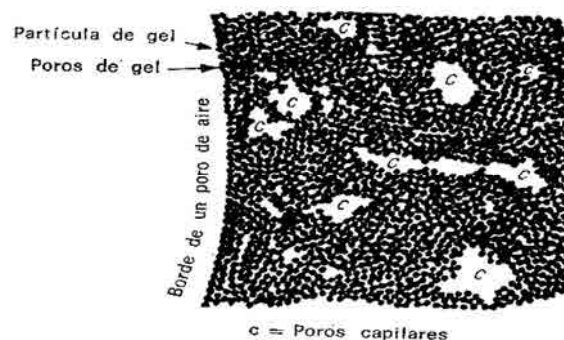


Fig. 28: Esquema de la porosidad del hormigón según Powers.

En la tabla 06 se recoge el tamaño y la terminología de los poros presentes en la pasta de cemento como se consideran comúnmente en la ciencia del hormigón.

According to IUPAC [1.35]		According to P. Mehta, 1986 [1.40]		According to S. Mindess <i>et al.</i> , 2002 [1.4]			
Name	Diameter	Pore type	Size range	Name	Diameter	Role of water	Paste properties affected
Micropores	Up to 2 nm	Interparticle space between C-S-H sheets	1 nm to 3 nm	Micropores "inter layer"	Up to 0.5 nm	Structural water involved in bonding	Shrinkage, creep at all RH
				Micropores	0.5 nm to 2.5 nm	Strongly adsorbed water; no menisci form	Shrinkage, creep at all RH
Mesopores	2 nm to 50 nm			Small (gel) capillaries	2.5 nm to 10 nm	Strong surface tension forces generated	Shrinkage between 50% and 80% RH
Macropores	>50 nm	Capillary pores (low w/c)	10 nm to 50 nm	Medium capillaries	10 nm to 50 nm	Moderate surface tension forces generated	Strength, permeability, shrinkage at high RH, >80%
		Capillary pores (high w/c)	3 μm to 5 μm	Large capillaries	50 nm to 10 μm	Behaves as bulk water	Strength, permeability
		Entrained voids	50 μm to 1 mm	Entrained air	0.1 mm to 1 mm		Strength

Notes

These are the most commonly mentioned classifications with reference to hydrated cement pastes. The hollow-shell pores were not included in the classification by S. Mindess *et al.*

Tabla 06: Clasificación de los poros contenidos en la pasta de cemento de acuerdo con la terminología de la ciencia del hormigón y su correspondencia con la tipología de la IUPAC [57].

Pero, independientemente de la clasificación según su tamaño, no todos los poros están en las mismas condiciones de servir de medio de penetración de los agentes agresivos al interior del hormigón. La porosidad que realmente va a afectar a nuestro estudio es la porosidad de tipo capilar, tanto la debida a la relación a/c y el grado de hidratación como la debida a los procesos de exudación en la puesta en obra.

El agua

El agua es el componente esencial para la confección del hormigón. En el hormigón fresco, por un lado, actuando como lubricante de las partículas facilitando su movilidad, y por otro, aportando cohesión entre ellas de forma que se obtiene un material con propiedades plásticas. A su vez, el agua es el reactivo indispensable para la reacción con las sustancias anhidras del cemento, permitiendo la consecución de nuevos productos que generan la estructura monolítica que forma el hormigón.

En la pasta de cemento endurecida puede encontrarse de las siguientes formas:

- Agua combinada químicamente, formada por los productos de hidratación del cemento. Ésta no se pierde por el simple secado al ambiente, si no que requiere elevadas temperaturas para la descomposición de los hidratos.
- Agua adsorbida, es decir, que está fuertemente unida a la superficie del gel y, a veces, relleno los microporos de gel. No es un agua con las propiedades de un agua libre y la pérdida de ésta es la principal causa de la retracción de la pasta de cemento.
- Agua capilar, es la que se encuentra en la pasta saturada ocupando los poros capilares. Puede considerarse agua libre, cuando su eliminación apenas altera el volumen de la pasta, o agua sujeta a tensiones capilares en poros de pequeño tamaño de modo que su eliminación contribuye a la retracción de la pasta de cemento endurecida [43].

1.6.2.3. Zona de transición pasta-árido

En las proximidades del árido se desarrolla una microestructura de la pasta de cemento diferente a la del resto del volumen de la pasta, aun considerando los áridos hidráulicamente inertes. Esta zona se describe como una región que se extiende radialmente hacia fuera desde la superficie del árido y se introduce gradualmente en la pasta de cemento. Destaca por su elevada porosidad y elevado contenido en hidróxido de calcio, el cual posee una orientación preferencial, perpendicular a la superficie del árido, contribuyendo, por todo ello, a la debilidad de la unión (Figura 28).

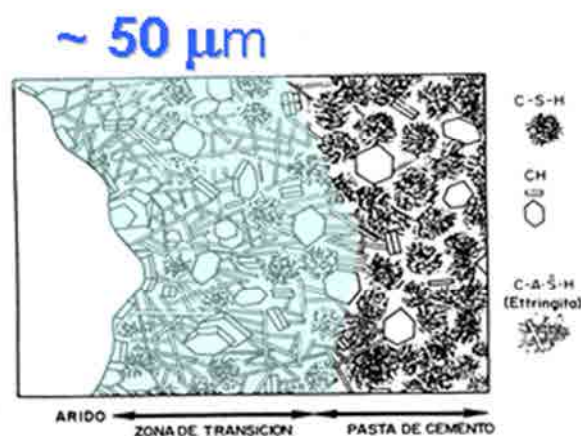


Fig. 28: Representación esquemática de la zona de transición pasta-árido, según Monteiro y Mehta.

Puede considerarse que la porosidad de la zona de transición es más elevada que la del resto de la pata y que, generalmente, también está estrechamente determinada por la relación a/c empleada en el amasado. En esta zona la relación a/c es superior a la existente en el resto del volumen de la pasta, debido a efectos superficiales y, a veces, a la exudación, lo que origina que el volumen y el tamaño de los poros en ella sea superior que en el resto de la pasta de cemento, contribuyendo a que la interfase sea más permeable y más débil desde el punto de vista mecánico.

Por otro lado, como los cristales de hidróxido cálcico son menos adherentes y resistentes que los de los silicatos hidratados (en menor proporción en esta zona) y poseen una orientación preferencial en la zona de transición, se favorece la propagación de microfisuras. Por ella es por donde comenzarán a crecer las fisuras cuando el hormigón se someta a cargas y este comportamiento es el responsable del trazo curvilíneo que presenta la línea de tensión-deformación ante esfuerzos de compresión.

Los áridos con formas alargadas y planas contribuyen a que se forme, durante la compactación del hormigón, una capa de agua bajo ellos, superior a la que se origina en áridos con morfologías menos alejadas de la forma esférica. Esta acumulación de agua (capilar) se produce por una migración de agua desde las partes bajas hacia las altas, originada por la diferencia de densidades, donde los áridos tenderán a asentarse en las partes bajas y el agua tenderá a ascender. Este fenómeno está relacionado con la mala fijación del agua en los finos de la mezcla (Figura 29).

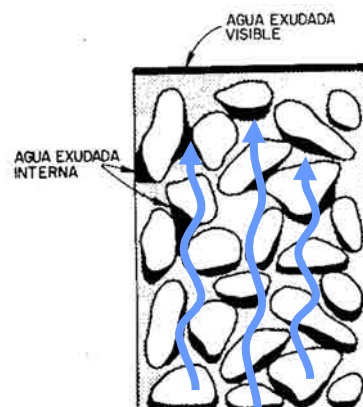


Fig. 29: Efecto del tamaño y forma de los granos del árido sobre la acumulación de agua y en las zonas inferiores de la interfase pasta-árido de cemento.

Esto pone de manifiesto, como se ha comentado anteriormente, que la zona más permeable del hormigón es la interfase pasta-árido, puesto que al ser la zona más porosa y donde pueden presentarse posibles microfisuras, va a permitir con mayor facilidad la penetración de agentes agresivos determinando con ello la durabilidad del hormigón.

En HAC, según diversos autores [44], la interfase pasta-árido puede ser más densa que en un hormigón convencional debido a la ausencia de vibración y al uso de mayor cantidad de finos, lo que puede conllevar a una mayor compacidad y por lo tanto, a una reducción de la velocidad de penetración de los agentes agresivos.

Es un hecho extensamente comprobado que la carbonatación progresa proporcionalmente con la raíz cuadrada del tiempo. La constante de proporcionalidad es el denominado coeficiente de carbonatación, K_c , y depende de todos los factores estudiados: tipo de ambiente y microestructura del hormigón.

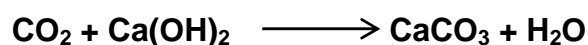
1.6.3. CARBONATACIÓN

La agresividad del ambiente y las características del hormigón determinan la vida útil de las estructuras, que afectan al proceso de corrosión de las armaduras, el cual es, sin duda, el proceso de degradación más importante que afecta a la durabilidad de los hormigones armados.

En ausencia de iones cloruro, la carbonatación es el principal proceso que posibilita la corrosión de las armaduras, ya que con ella se pierde la pasividad que poseen en un medio con alcalinidad elevada.

Los poros del hormigón permiten que el CO_2 atmosférico pueda penetrar por difusión a través de ellos. Allí tendrá lugar una reacción química entre los productos de hidratación del cemento, en particular entre la portlandita y el CO_2 , para transformarse en carbonato cálcico como producto final, razón por la

que se le conoce como carbonatación y puede formularse según la siguiente reacción:



La carbonatación es la principal causa de la disminución de alcalinidad que puede experimentar el hormigón, ya que es precisamente el Ca(OH)_2 el responsable de los altos valores de alcalinidad que presenta el hormigón y, en consecuencia, cuando éste se haya carbonatado totalmente, se producirá un descenso apreciable del pH que puede llegar a tomar valores inferiores a 9. Esta reducción de la basicidad del medio puede poner en riesgo las armaduras según predice el diagrama de Pourbaix (Figura 30)

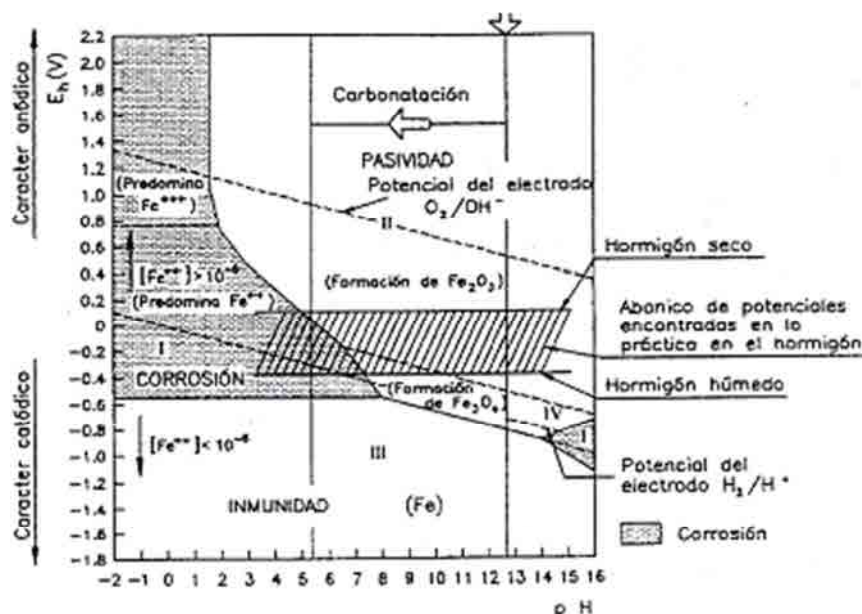


Fig. 30: Diagrama de Pourbaix hierro-agua y condiciones reales del acero embebido en el hormigón.

La velocidad de difusión del gas puede verse influenciada, al igual que los procesos corrosivos, por las condiciones ambientales, fundamentalmente por la presencia de humedad en el ambiente. La profundidad de carbonatación sigue una ley ajustable a la raíz cuadrada del tiempo, en la forma:

$$d = K_c \sqrt{t}$$

donde d, es la profundidad de carbonatación, normalmente en mm; t el tiempo

en años y K_c el coeficiente de carbonatación el $(\text{mm/año})^{1/2}$. Este coeficiente está relacionado con diferentes parámetros del hormigón y con las condiciones ambientales.

Como se sabe, la carbonatación es un proceso que se desarrolla de forma muy lenta puesto que la concentración de CO_2 en el aire es relativamente baja, del orden de 0,03 % en volumen. Bajo algunas circunstancias puede aumentar ligeramente ya que la concentración varía un poco con la presión y temperatura; y siempre será mayor en ambientes urbanos e industriales que en el medio rural.

Es necesario destacar que la difusión del CO_2 se ve favorecida en los poros vacíos, pues en el aire su difusión es diez mil veces mayor que en el agua. Como consecuencia de ello, cuando los poros están saturados de agua, la penetración es casi despreciable y la carbonatación casi inexistente. En el extremo opuesto, es decir, en un medio seco y con una humedad relativa muy baja, la carbonatación tampoco se verá favorecida ya que la película de agua adherida en la superficie de los poros es insuficiente para disolver el gas carbónico o para que los iones puedan adquirir cierta movilidad. Por lo tanto, para que la carbonatación progrese a su mayor velocidad es necesario un medio donde los poros no estén totalmente saturados, sino en el que sólo esté mojada su superficie. En la Figura 31 puede apreciarse que la humedad óptima de avance del frente se sitúa entre el 50 y el 80 % de humedad relativa. A humedades mayores los poros están saturados en agua y, el gas CO_2 penetra con más dificultad hacia el interior, mientras que a humedades inferiores, los poros están casi secos y el CO_2 no puede reaccionar sin la existencia de un medio líquido.

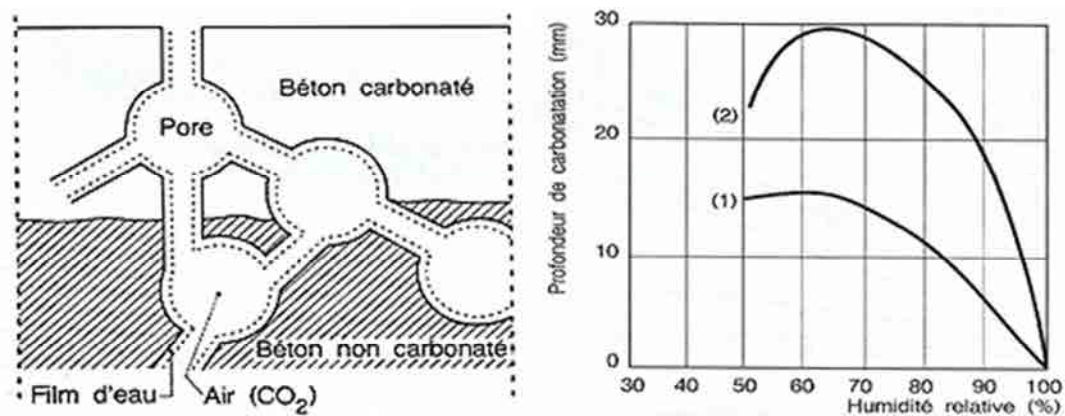


Fig. 31: Influencia de la humedad relativa sobre la profundidad de carbonatación para una relación a/c de 0.8 (1) y 0.6 (2).

Por parte del hormigón el factor más importante en el proceso de carbonatación es la relación a/c que, por determinar la porosidad capilar, influirá decisivamente en la permeabilidad y, con ella, la penetrabilidad del CO₂. En la Figura 32 puede observarse que el espesor carbonatado crece considerablemente a medida que aumenta la relación a/c.

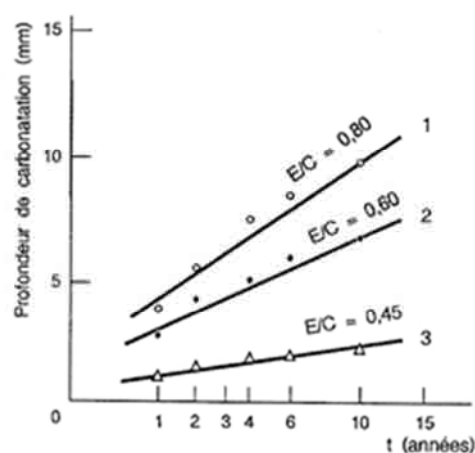


Fig. 32: Crecimiento de la carbonatación para hormigón con tres relaciones a/c diferentes, curados a 20° C y en un ambiente con un 50% de HR.

Otro factor que, sin duda, condiciona la profundidad de carbonatación en el hormigón es la cantidad de cemento empleada en su fabricación, puesto que es el que aporta la alcalinidad al hidratarse. A menores cantidades de cemento, la profundidad de carbonatación aumenta puesto que disminuye la cantidad de sustancias carbonatables. En la Fig. 32 se representan 5 hormigones con distintas dosis de cemento, expuestos durante 5 años a un ambiente natural.

1.6.4. CORROSIÓN DE ARMADURAS

Cuando un hormigón se encuentra carbonatado las armaduras embebidas en él pierden la capa pasiva que les confiere estabilidad, ya que esta capa desaparece cuando el pH del hormigón, que sin carbonatar alcanza valores superiores a 13, desciende por debajo de 9.

Una vez que el hormigón se ha carbonatado y deja de proteger a las armaduras, la estabilidad de éstas se encuentra determinada principalmente por las características del ambiente, en especial por las condiciones de humedad y por la facilidad de penetración del oxígeno atmosférico, lo que depende fundamentalmente de las características del hormigón.

Respecto a las características del ambiente, en la Figura 33 se indica mediante una línea de trazo continuo, a grosso modo, el riesgo relativo de corrosión en función del valor de la humedad relativa, íntimamente relacionada con la cantidad de agua contenida en los poros de hormigón, para un ambiente ordinario. La escala de agresividad se ha definido de modo que la agresividad es directamente proporcional al espesor del recubrimiento requerido para producir un determinado daño. [37]

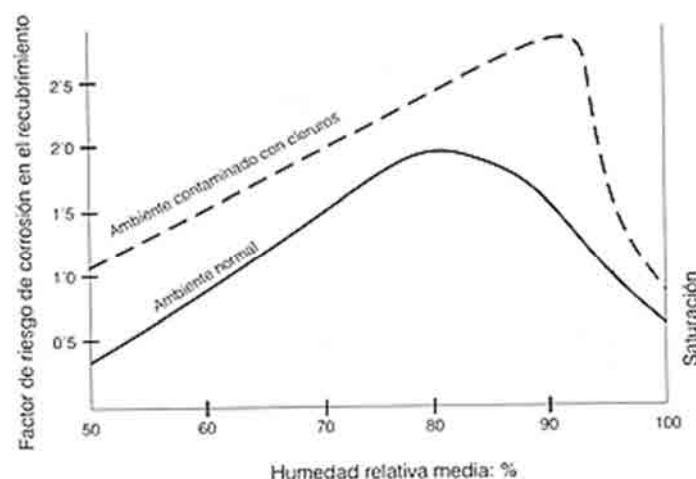


Fig. 33: Influencia del contenido de humedad sobre el riesgo de corrosión en relación con el recubrimiento.

Una vez que las armaduras han perdido la capa pasiva, el recubrimiento de hormigón sólo juega el papel de dificultar la penetración de oxígeno,

indispensable para la corrosión metálica. Normalmente la permeabilidad a estas sustancias es más que suficiente como para permitir un proceso corrosivo intolerable, si bien la saturación de humedad puede atenuar la llegada de éste hasta la superficie metálica. El papel del recubrimiento es fundamental en los procesos de despasivación, pero es muy secundario cuando ésta se ha producido.

1.6.5. DURABILIDAD DEL HAC

Se han revisado numerosas investigaciones publicadas sobre la durabilidad del HAC, en las que las conclusiones obtenidas no presentan total unanimidad. En la mayoría de ellas se ha evaluado el riesgo de degradación de las que han partido de un estudio de dosificación, modificando sus componentes y composición con objeto de influir así en la estructura porosa, y las que se han basado en el estudio de los procesos de transporte de sustancias agresivas en el seno del hormigón.

En la revisión realizada no se ha encontrado ningún estudio que aborde el tema de la durabilidad a través de los procesos de corrosión de armaduras. En casi todos ellos se ha evaluado la influencia de la porosidad en los mecanismos de deterioro de las estructuras de hormigón, existiendo, no obstante, bastante escasez en cuanto a ciertos aspectos que pueden relacionarse con la durabilidad, como es la puesta en obra.

Respecto a la porosidad, las conclusiones son variadas y algo contradictorias. En principio, parece haber un consenso general en que la estructura interna de los HAC es más densa, es decir, que presentan mayor compacidad [45]. Este hecho ha sido corroborado con varios estudios en los que se caracteriza la microestructura de HAC utilizando métodos de análisis de imágenes. Un ejemplo de ellos es la investigación llevada a cabo en le *Magne/ Laboratory for Concrete Research* de Bélgica [13] que se centró en caracterizar la microestructura del HAC comparándola con la del convencional a través de técnicas de microscopía. Además, se pretendió verificar si la microestructura de

la pasta del HAC se hacía más densa con el uso de grandes cantidades de filler. Para ello se fabricaron los hormigones correspondientes a una serie de pastas con distintas cantidades de filler.

Mediante el uso de la microscopía óptica se analizó la matriz cementicia, identificándose con claridad las diferencias existentes entre ambos hormigones, especialmente la zona de transición pasta-árido (Figura 34). También se realizaron observaciones con el microscopio electrónico pudiéndose observar zonas de debilidad mucho mayores en el HV que en el HAC, tal y como ocurrió con las observaciones de microscopía óptica. Con todos estos datos se concluyó que el HAC poseía una estructura más densa, debido a la presencia de una importante cantidad de filler en la matriz de cemento, manifestándose sobre todo en las zonas de transición y en la ausencia de microfisuras, por lo que el HAC podría considerarse más durable al poseer menos porosidad capilar.

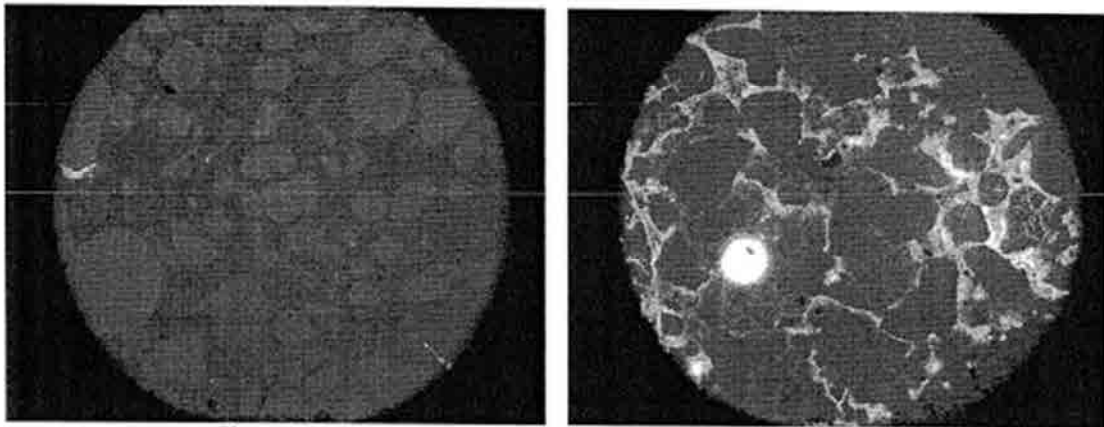


Figura 34: A la izquierda se observa la compacidad presente en la estructura interna del hormigón autocompactante, mientras que a la derecha puede apreciarse la debilidad de las zonas de transición pasta-árido de los hormigones vibrados [13].

Otra investigación desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid, fue llevada a cabo sobre diferentes dosificaciones de HAC en los que variaba el tipo de cemento y la clase de adición [46]. Se realizaron los ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, tracción indirecta, penetración de agua a presión y porosimetría por inyección de mercurio sobre probetas cilíndricas de 15 x 30 cm. En lo que respecta a la durabilidad, se concluye que

con el uso de cenizas volantes como adición se obtiene un menor tamaño de poro, lo que aumenta la compacidad de la matriz y dificulta la penetración de agua y de agentes agresivos. En contraposición, la penetración al agua fue mayor con el uso de cementos con escorias (CEM II A/S 42,5N) a pesar de que la resistencia y la porosidad eran similares al resto de hormigones fabricados con otros tipos de cemento.

Sin embargo, existen otras investigaciones que, también, a través del estudio de diferentes propiedades relacionadas con la porosidad, no han podido confirmar la mayor durabilidad del HAC.

Este es el caso de un estudio realizado en los *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions* [47] que pretendía comprobar si los HAC eran más durables que los hormigones vibrados tradicionales, atendiendo a sus propiedades físico-químicas y relacionándolas con la porosidad, con las propiedades de transporte y con la disminución de la basicidad. Se estudiaron hormigones dosificados para que presentasen tres clases resistentes: 20, 40 y 60 Mpa. En los resultados obtenidos de la porosidad se observó que los HAC eran ligeramente más porosos que los vibrados de referencia, tanto en el ensayo de porosidad total como en el de porosimetría por inyección de mercurio. Este hecho quizás sea explicable por la diferente relación a/c, que no era la misma en ambos tipos de hormigón, ya que se había calculado con el fin de obtener un valor de resistencia determinado y habiendo resultado ser, en este caso, algo mayor en el autocompactante que en el vibrado.

Para caracterizar las propiedades de transporte se realizaron ensayos de difusión de cloruros, de permeabilidad al oxígeno y de absorción de agua por capilaridad. El coeficiente de difusión de cloruros resultó ser equivalente para ambos hormigones y la permeabilidad al oxígeno era algo mayor en lo HAC que en los convencionales, o bien equivalente, dependiendo de la clase resistente. Sin embargo, los mayores valores de absorción capilar correspondían a los HAC.

Si se matizan algunos aspectos de la porosidad, podríamos decir que los resultados sobre el tamaño de los poros parecen haber resultado similares en todas las investigaciones realizadas. En el HAC el radio medio de poro es normalmente menor que en el hormigón vibrado de referencia, lo cual se atribuye al mayor contenido de finos adicionales que éste posee y que actúa como germen cristalino favoreciendo la formación de hidratos en las cavidades capilares, haciendo con ello que su tamaño disminuya.

Otra investigación llevada a cabo en el *Magnel Laboratory for Concrete Research* de Bélgica [48] estudió la estructura porosa, en este caso, de las pastas de cemento del HAC y del HV a través de la porosimetría por inyección de mercurio. Se hizo variando el tipo de cemento, la relación a/c y el tipo y cantidad de fino adicional, pues suponen que estos factores son los que, en mayor o menor medida, influyen en la porosidad del hormigón. Los ensayos se realizaron sobre probetas prismáticas de 12x12x20 mm que se secaron en estufa a 105 °C hasta peso constante.

Si se comparan los resultados obtenidos en las pastas de cemento de los hormigones tradicionales con las de los HAC con la misma dosis de cemento y relación a/c, el volumen de poros capilares puede considerarse el mismo para ambos hormigones, aunque la porosidad total del HAC sea mayor. En todo caso, éste posee poros de un diámetro medio menor, lo cual debe conferirle una estructura más densa y menos permeable que la del HV. Este hecho depende en gran medida de la relación a/c que posean las mezclas, así como de la cantidad de filler adicionado.

Como ya se ha dicho, no existe ninguna investigación que aborde el tema de la corrosión en estructuras en el HAC, aunque algunas intentan estimar cuál será su comportamiento a través del estudio del proceso de carbonatación.

Cómo afecta la calidad del hormigón en la difusión del CO₂ y cuál es su repercusión en la durabilidad de las armaduras, este tema se estudia en una

investigación realizada en el *Magnel Laboratory for Concrete Research* de Bélgica [49], en la que también se comparan diferentes mezclas de HAC con hormigones vibrados de referencia. Primeramente se intentó evaluar en qué medida influyen algunos factores relacionados con la dosificación, como el tipo de cemento, la relación a/c o el tipo y la cantidad de finos adicionales en la porosidad del hormigón. Pero las variaciones que estos factores introducen en la estructura interna del hormigón fueron evaluadas a través de la penetración del CO₂ mediante un ensayo acelerado. Para ello, las probetas del estudio fueron sometidas a un ambiente de 20 ° C, un 60 % de humedad relativa y un 10 % de CO₂, midiendo la profundidad de carbonatación en diferentes periodos de tiempo.

Del estudio se concluye que la difusión de CO₂ en el hormigón está principalmente determinada por la porosidad capilar, siendo, según los resultados obtenidos en esta investigación, la profundidad de carbonatación mayor en los HAC que en los hormigones convencionales de referencia. De acuerdo con esto, los HAC serían menos durables que los hormigones vibrados tradicionales para la misma dosis de cemento y relación a/c.

De igual modo, los resultados obtenidos en los ensayos realizados para medir la variación de pH al ser atacado por dióxido de carbono y por nitrato amónico, llevados a cabo en la investigación anteriormente citada [47], indican que la sensibilidad del hormigón a la carbonatación se ve incrementada en el HAC, siendo similar el comportamiento en ambos hormigones cuando se trata de lixiviación por nitrato amónico.

Un hecho a destacar es que, en la mayoría de los estudios revisados se evalúa la influencia que tienen las diferentes composiciones de las mezclas en la porosidad, sobre todo, en pequeñas probetas de laboratorio. Sin embargo, existen muy pocos estudios que tengan en cuenta la porosidad derivada de la puesta en obra. Uno de los pocos trabajos es la investigación realizada para determinar la resistencia a la segregación de los HAC [50] donde se analizan algunas propiedades mecánicas y físicas del material en piezas de 1,5 y 3 m.

de altura, llegando a la conclusión de que la estabilidad de las mezclas, tanto para los HAC como para los hormigones convencionales vibrados mediante vibración externa, es similar o incluso algo mejor en los hormigones tradicionales. Según otra investigación [52] no existen diferencias significativas entre ambos materiales, si bien los HAC tienden a presentar mayor estabilidad cuando se trabaja en estructuras con mayor armado y secciones estrechas, donde es imposible garantizar una correcta compactación de los hormigones vibrados convencionales.

El último trabajo encontrado sobre este aspecto se ha realizado en la Universidad Politécnica de Valencia [51], donde se estudia la homogeneidad del HAC en piezas hormigonadas verticalmente, determinando su resistencia a la segregación y la uniformidad de la estructura porosa, a través de ensayos de resistencia a la segregación, de absorción de agua, de profundidad de penetración al agua y de porosimetría por inyección de mercurio. Para ello se fabricaron también, dos tipos de hormigones, uno autocompactante y otro convencional, con las misma relación a/c y dosis de cemento. Los resultados ponen de manifiesto que los HAC presentan una buena resistencia a la segregación, aunque algo menor que la registrada en los hormigones tradicionales. A pesar de ello, los autores opinan que el HAC puede considerarse ligeramente más uniforme con la altura, debido probablemente a un menor sangrado.

Como conclusión de la revisión bibliográfica realizada, puede indicarse que los resultados no son lo suficiente concluyentes para afirmar que los HAC van a ser más durables que los hormigones vibrados tradicionales. Por un lado, los HAC parecen verse favorecidos por su menor tamaño de poros, pero la profundidad de carbonatación siempre ha resultado ser algo más elevada. Por otro lado, la sensibilidad a la segregación como consecuencia de la puesta en obra no ha quedado bien establecida en qué tipo de hormigón es mayor. Procede, por tanto, continuar con estudios que puedan contribuir a esclarecer estos aspectos.

1.7. TIPIFICACIÓN DE LOS HAC

La tipificación de los HAC es análoga a la de los hormigones de compactación convencional según el Artículo 39.2 de la Instrucción EHE-08, sin más, que utilizar como indicativo C de la consistencia las siglas AC, (como, por ejemplo, HA-35/AC/20/IIIa), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T-R/AC/TM/A$$

Alternativamente, se podrá definir la autocompactabilidad mediante la combinación de las clases correspondientes al escurrimiento (AC-E), viscosidad (AC-V) y resistencia al bloqueo (AC-RB), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T-R/(AC-E+AC-V+AC-RB)/TM/A$$

donde T, M, TM y A tienen el mismo significado que el apartado 39.2 de la Instrucción y AC-E, AC-V y AC-RB, representan las clases correspondientes de acuerdo con las tablas A17.3, A17.4 y A17.5.

Según los resultados obtenidos en el ensayo de escurrimiento se hará una clasificación para determinar el grado de aceptación del mismo.

DIÁMETRO DE EXTENSIÓN DE FLUJO mm	
CLASE	Criterio UNE 83361:2007
AC-E1	$550 \leq d_f \leq 650$
AC-E2	$650 \leq d_f \leq 750$
AC-E3	$750 \leq d_f \leq 850$

Tabla 07: Clases de escurrimiento según la EHE.

En los ensayos de escurrimiento, embudo en V, anillo J y caja en L será una clasificación según el grado de viscosidad de la mezcla, de acuerdo con las siguientes tablas:

VISCOSIDAD segundos		
CLASE	T_{50} , criterio	Criterio alternativo T_v
AC-V1	$2'5 \text{ s} < T_{50} \leq 8 \text{ s}$	$10 \text{ s} \leq T_{50} \leq 20 \text{ s}$
AC-V2	$2 \text{ s} < T_{50} < 8 \text{ s}$	$6 \text{ s} \leq T_{50} \leq 10 \text{ s}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ s}$	$4 \text{ s} \leq T_{50} \leq 6 \text{ s}$

Tabla 08: Clases de viscosidad según EHE.

Para situaciones en que el hormigón haya de fluir por zonas con espesores inferiores a 60 mm, se deberá analizar el comportamiento de forma experimental, diseñando elementos que permitan valorar la resistencia específica al bloqueo para el caso concreto.

RESISTENCIA AL BLOQUEO			
CLASE	EXIGENCIA DE LA CARACTERISTICA	Criterio por el ensayo del anillo Japonés Según UNE 12350-12=2011	Criterio por el ensayo de Caja en L Según UNE 12350-10=2011
AC-RB1	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea superior a 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 80 y 100 mm.	$d_{jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, con un anillo de 12 barras	≥ 0.80 , con 2 barras
AC-RB2	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea igual o inferior a 20 o el espesor de los huecos por que pase el hormigón está comprendido entre 60 y 80 mm.	$d_{jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, con un anillo de 20 barras	≥ 0.80 , con 3 barras

Tabla 09: Clases de resistencia al bloqueo según EHE-08.

donde,

d_f representa el escurrimiento en el ensayo según UNE 83.361 y

D_{Jf} , representa el escurrimiento en el ensayo del anillo J, según UNE 83.362.

En general, se considera la clase de autocompactabilidad AC-E1 como la más adecuada para la mayor parte de los elementos estructurales que se construyen habitualmente. En particular se recomienda su empleo en los siguientes casos:

1. estructuras no muy fuertemente armadas,
2. estructuras en las que el llenado de los encofrados es sencillo, el hormigón puede pasar por huecos amplios y los puntos de vertido del mismo no exige que se desplace horizontalmente largas distancias en el interior del encofrado.
3. elementos estructurales en que la superficie no encofrada se separa ligeramente de la horizontal.

Por su parte, se recomienda la clase de autocompactabilidad AC-E3 en los siguientes casos:

- Estructuras muy fuertemente armadas.
- Estructuras en las que el llenado de los encofrados es muy difícil, el hormigón debe pasar por huecos muy pequeños y los puntos de vertido del mismo exigen que se desplace horizontalmente distancias muy largas en el interior del encofrado.
- Elementos estructurales horizontales en los que es muy importante conseguir la autonivelación del propio hormigón.
- Elementos estructurales muy altos, de gran esbeltez y muy fuertemente armados.

Las Directrices Europeas para el HAC hacen una clasificación de acuerdo con los criterios de caracterización para el estado fresco anteriormente descritos, para su aplicación en obra. Ésta no considera condiciones especiales

de confinamiento, la geometría de los elementos, el método de llenado o las características de los materiales usados en la mezcla del hormigón, por lo que será preciso analizar con el suministrador del hormigón las especificaciones finales antes de tomar una decisión.



CAPITULO 2

OBJETIVOS Y DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

El trabajo que se presenta tiene como objetivo general comparar las propiedades de dos hormigones en su estado fresco y endurecido, para ello se estudia las diferencias entre sus propiedades, uno tradicional vibrado y otro con propiedades de autocompactabilidad, confeccionados y destinados para su uso comercial en condiciones y obras reales.

Las diferencias deseables solo serían las relacionadas con sus propiedades reológicas en estado fresco, pero sin deterioro de las relacionadas con sus propiedades tecnológicas y de durabilidad no deberían reducirse, en concreto, las necesarias para un hormigón utilizado en una estructura vista, ubicada en un ambiente similar al de Granada.

Para poder establecer las posibles diferencias se hace necesario respetar unos condicionantes iniciales, mantener constante la relación a/c y la cantidad de cemento en los dos hormigones objeto de estudio, el convencional puesto en obra mediante vibrado y el hormigón autocompactante, sin aporte de ningún tipo de energía complementaria. Variando únicamente aspectos relacionados con la dosificación de sus áridos afectando a la granulometría, tipo y cantidad de aditivos actualmente en uso.

Debido a la igualdad de la relación a/c y cantidad de cemento, se considera que las diferencias de porosidad entre ambos hormigones sólo podrían ser atribuibles a diferentes compactado de las probetas y, tal vez, a la mayor proporción de filler con la que se confecciona el autocompactante. Se han apuntado razones para pensar que estas diferencias podrían deberse, sobre todo, a los efectos de la puesta en obra ya que durante este proceso podrían presentarse fenómenos de exudación o segregación. Desde luego, cabe la posibilidad de que en ambos hormigones puedan manifestarse; en los autocompactantes, por su elevada fluidez y, en los convencionales por efecto del vibrado.

Al ser la porosidad la que determina tanto, las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los hormigones, se ha querido comprobar una vez más las posibles diferencias existentes con respecto a este parámetro en los dos hormigones objetos de estudio.

Es necesario caracterizar sus propiedades más relevantes en estado fresco relacionadas con su facilidad de puesta en obra y resistencia a la segregación, por su gran influencia en la porosidad global.

Directamente relacionado con la porosidad y la posible segregación, la permeabilidad puede aportar información sobre la interconexión de la macroporosidad o porosidad capilar, al ser esta la vía de penetración de los agentes agresivos, sobre todo en fase acuosa. Por lo que se considera interesante comprobar el grado de intercomunicación de la porosidad existente mediante el ensayo de penetración de agua a presión, tanto en la misma dirección como en el perpendicular al sentido de hormigonado, con el fin de evaluar la homogeneidad final obtenida en ambos hormigones, tanto mayor como menor sea la diferencia entre ambas direcciones.

El estudio del frente de carbonatación acelerada, permitirá establecer el grado de intercomunicación de los poros con mayor independencia de su tamaño y permitirá evaluar la durabilidad de forma más concreta ya que la clase general de exposición en las que se ubican los elementos confeccionados con estos hormigones se corresponde con un ambiente IIa.

Las resistencias mecánicas son un referente clásico de la calidad de los hormigones e íntimamente relacionado con la porosidad, también se incluye su estudio junto con otras propiedades en su estado endurecido, mediante las cuales se pueden producir diferencias debido a su diferente composición granulométrica, sobre todo en cuanto al contenido de finos en los hormigones autocompactantes.

Según la bibliografía consultada, otro parámetro que puede verse afectado por el alto contenido en finos sería la bajada del módulo de elasticidad y por tanto su velocidad de propagación de los ultrasonidos. Por ello y porque puede dar luz al estudio de la homogeneidad se propone su estudio como otro parámetro para ayudar a evaluar las posibles diferencias entre ambos hormigones.

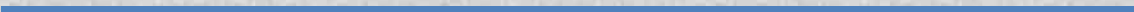
Para conseguir estos objetivos se considera necesario:

- Determinar los parámetros en estado fresco regulados en el anejo 17 de la EHE para valorar la autocompactabilidad en su estado fresco, tanto a pie de obra para su recepción, como los realizados en laboratorio para su diseño y caracterización de estos hormigones. Y lo referido en el artículo A17.2 cuya finalidad es caracterizar los hormigones convencionales que de aquí en adelante se designarán con HV.
- Aunque conocer el contenido de aire ocluido sería deseable, dada la premura de la toma de muestras del HAC, por motivos propios condicionados por la planta de hormigonado, no ha sido posible determinarlo.
- La confección, curado y conservación de las probetas durante el tiempo requerido para la realización de los ensayos.
- Estudio de la velocidad de propagación mediante ultrasonidos y rotura a compresión. Determinación de densidades real, aparente y porosidad global, no siendo posible determinar su microporosidad mediante porosimetría de mercurio por causas ajenas al estudio.
- Extracción de testigos en la dirección vertical y transversal del llenado de las probetas, para determinar las diferencias de los valores obtenidos en los siguientes ensayos: permeabilidad, velocidad de propagación de sonidos y módulo elástico.
- Corte y preparación de piezas elaboradas a partir de las probetas para determinar el frente de carbonatación mediante métodos acelerados.



CAPITULO 3

CARACTERIZACIÓN Y METODOLOGIA



Para poder abordar los objetivos del trabajo es necesario partir de unas probetas físicas y representativas de ambos hormigones con las que llevar a cabo la investigación y dado que la dosificación del HAC viene impuesta por la planta de hormigón preparado, para poder establecer la dosificación del hormigón vibrado con consistencia plástica, para ello es necesario caracterizar los componentes y efectuar la dosificación correspondiente manteniendo constante la misma relación a/c y cantidad de cemento.

La metodología seguida para abordar el trabajo y los matices de los procesos en las determinaciones realizadas se describen en los puntos que siguen a continuación.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES

Las características de un hormigón de fábrica vienen definidas y condicionadas por la proporción, propiedades y calidad de sus componentes. A continuación se exponen, las características tanto de las materias primas usadas, como las de las mezclas elaboradas en laboratorio.

Los materiales empleados en la fabricación de los hormigones objetos de este estudio, tanto del autocompactante modelo “Agila” para elementos verticales suministrado por la “Lafarge” como el hormigón convencional realizado en laboratorio, han sido elaborados con los materiales disponibles en la zona de Granada. Todos ellos cumplen las prescripciones de la EHE vigente, según los suministradores. Sus características se describen brevemente en los siguientes apartados.

3.1.1. Cemento

El cemento utilizado ha sido un CEM I 42,5 R, facilitado por Holcim procedente de la fábrica de Gador (Almería). Sus características se recogen en el Anejo 1.

3.1.2. Filler

Se ha utilizado un filler calizo procedente de la cantera de Darro en

Granada, de la empresa “Omya Clariana”. El Betocarb de Omya es un filler elaborado a base de calizas de gran calidad y fabricado con una curva granulométrica muy regular que permite su empleo en todo tipo de hormigones.

El filler proporciona un ahorro en la cantidad final de cemento utilizado, también mejora la fluidez de la mezcla y la trabajabilidad de la misma. Otra de sus funciones es su capacidad para facilitar una segregación y exudación reducida. Sus características se recogen en el Anejo 2.

3.1.3. Árido

El árido utilizado para ambos tipos de hormigones, procede de Beas de Granada, de la empresa “Triturados Puerto Blanco”. Presentaba una mineralogía variada siendo fundamentalmente de naturaleza dolomítica, con algunos granos esquistosos. La dolomía es uno de los recursos minerales más utilizados en nuestro país y en gran parte de la Unión Europea. En Andalucía en general, y Granada, en particular, es un recurso minero muy explotado debido a la calidad, abundancia y facilidad de extracción que presenta en los macizos de la orla carbonatada de Sierra Nevada.

Triturados Puerto Blanco explota la dolomía en sus instalaciones mineras generando un amplio espectro de productos y granulometrías que van desde el Polvo dolomítico hasta la piedra clasificada de 450 mm.



Fig. 34: Áridos usados para la fabricación de los hormigones.

En el laboratorio se ha determinado algunas características de los áridos necesarias para el cálculo de la dosificación de los hormigones [27], [31], [34]. Para ello se realizaron diferentes ensayos para obtener una correcta caracterización de los áridos, obteniendo su análisis granulométrico, contenido en finos y la densidad aparente, tanto de la grava como de la arena junto con sus respectivas absorciones.

Dada la gran incidencia de cantidad y calidad de los finos que acompañan a las fracciones de árido, sobre todo la arena, en la retracción plásticas por su mayor o menor demanda de agua, así como su mayor retracción por secado, tanto mayor cuanto más finos sean, se ha considerado la necesidad de evaluar su cantidad mediante técnica de lavado y su calidad determinando el valor de azul de metileno, es decir, la absorción de este en función de su superficie específica y la actividad de dicha superficie debido a su meteorización. Además del equivalente de arena, que como es sabido conjuga calidad y cantidad de finos en un solo ensayo.

3.1.3.1. Valoración de finos

Para evaluar el contenido de finos de los áridos, se procedió primeramente a pesar una cantidad cuarteada de grava y arena. Después de una correcta toma de muestras se ensayan, previo cuarteo se ensayan sendas muestras para determinar su contenidos en finos mediante lavada, con el tamiz 0,063. Seguidamente se procedió de igual manera con la grava, se fue lavando la muestra lentamente y con apenas presión de agua hasta llegar a limpiar el chino de limos, terrones e impurezas, véase figura 36. Aunque la mayor parte de los finos se eliminan por lavado, se ha procedido con posterioridad al tamizado del producto seco restante en la bandeja. Considerando la cantidad total de finos el resultado del lavado más el tamizado.



Fig. 35: Proceso de lavado de la grava.

Para determinar el ensayo de equivalente de arena en la muestra, según la norma UNE-EN 933-8=2000. Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. Se proceda a la reducción de la muestra de arena necesaria y se cogen dos tomas de cada.



Fig. 36: Proceso de cuarteo de la grava.

Se coge una parte de unos 85 cc mediante cuarteo, se adiciona sobre una proporción de disolución establecida en esta norma y después del

correspondiente agitado se deja reposar durante 20 minutos y se determina la relación que existe entre la altura de la arena y el frente de sedimentación. Tal como se aprecia en la figura 38 no se distingue con claridad la frontera entre la arena sedimentada y el fondo de sedimentación, por lo que se recurre a determinar la altura de la arena mediante pisón en vez de a vista como establece la norma. Los resultados obtenidos se detallan en el capítulo 4...xx



Fig. 37: Ensayo de equivalente de arenas.

Para realizar una evaluación de los finos se realizó el ensayo de azul de metileno, en base a la norma UNE-EN 933-9=2010. “Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno”. Este ensayo indica el procedimiento para determinar la calidad de los finos aportados por el árido mediante la determinación del Valor de Azul de Metileno. Ya que el filler “Betocarb” presenta una absorción muy baja, irrelevante no se ha considerado necesario su determinación.

En esencia este ensayo consiste en saturar con azul de metileno toda la superficie del árido presente en la muestra que está en función de la superficie específica presente y la actividad superficial. La solución de Azul de Metileno es añadida a la suspensión en pequeños incrementos hasta conseguir que una mancha de dicha disolución sobre un papel de filtro presente una aureola que

manifieste la migración del azul de metileno y sea mantenida durante cinco minutos en torno al depósito solido en un recipiente que contiene agua destilada y la muestra de material menor del tamiz 0,125 mm, con una cantidad superior a 200 gramos de muestra. Después de cada incremento se retira del recipiente una pequeña cantidad de la suspensión constituida por la fase acuosa, arena y la suspensión de azul, empleando una varilla agitadora de vidrio de 8mm y se deja caer en forma de gota sobre un papel filtro. Cuando la muestra de agregado no pueda adsorber más azul de metileno se forma un anillo azul claro persistente en el papel filtro, de aproximadamente 1 mm, en la zona húmeda alrededor del depósito central. En este momento se procede a cuantificar la cantidad de suspensión de azul de metileno añadida y a calcular la cantidad necesaria para neutralizar la adsorción de la superficie específica del árido, a esto se le denomina como el valor de azul de metileno (mg/g miligramos de Azul por gramo de suelo).

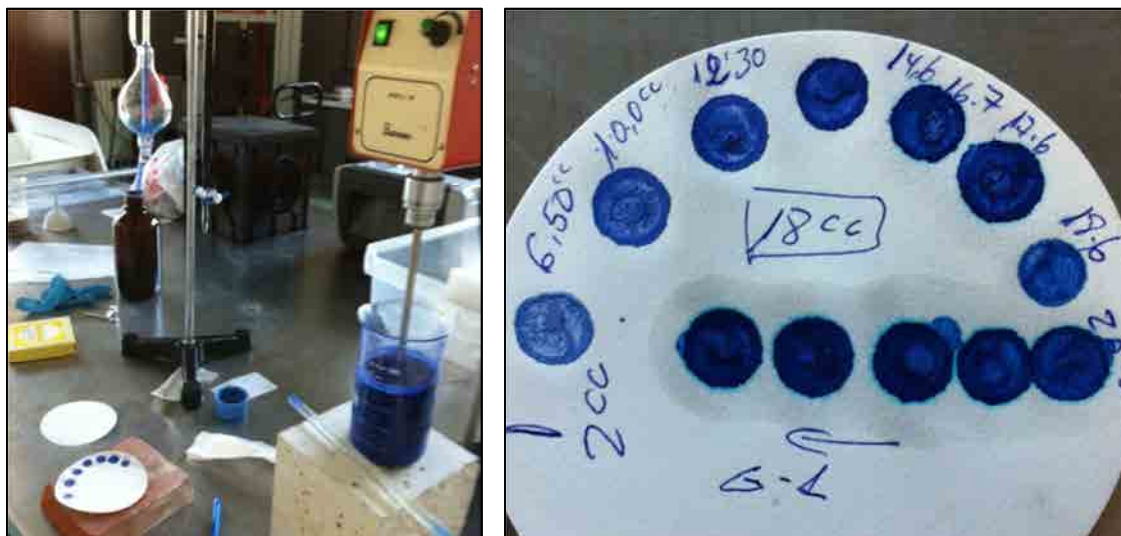


Fig. 38: Ensayo de Azul de Metileno

3.1.3.2. Densidad y Absorción

La densidad del árido se obtiene sobre una proporción de arena y grava similar a la dosificación del hormigón. Después del molido en la machacadora de mandíbulas, se prosigue la molturación después del homogeneizado y cuarteado del producto obtenido, se afina el tamaño, hasta que pase la totalidad por el tamiz 0,063, en el molino de Ágata para obtener una mayor finura de molido. Después del secado hasta peso constante y mantenido a

temperatura ambiente se procede al llenado de los picnómetros para determinar la densidad. Este proceso es el mismo que se seguirá para la determinación de la densidad real de los hormigones.

La absorción de humedad de la arena se determina según la norma UNE 000. Una vez conseguida la humedad máxima que permite el desmoronamiento del cono de arena al levantar el cono metálico se procede a determinar su valor de humedad. El cono ha sido llenado en 2 tongadas y dándole con el pisón 30 toques en cada tongada. Tras este proceso, repetido cada vez con menos humedad, se levanta y se observa cuando se inicia el desmoronamiento, véase figura 39.



Fig. 39: Arena tras realizar el ensayo con el cono.

La absorción de las gravas se cuantifica mediante la relación entre la muestra saturada y la muestra seca, al mismo tiempo que se determina la masa saturada sumergida en la balanza hidrostática, para calcular junto con los otros valores la densidad aparente de la grava. Ambos valores serán utilizados en la dosificación de los hormigones.

Los resultados de las distintas determinaciones, tanto de la grava como de la arena, utilizadas para poder formular los respectivos hormigones se recogen en las tablas 10 y 11.

Fracción	D. Aparente kg/m ³	Absorción %	Equivalente de arena	Valor de Azul g/100g
Arena	2,72	2,40	71%	0,405

Tabla 10: Características ensayadas de los arenas.

Fracción	Densidad kg/m ³	Absorción %
Grava	2,74	0,69

Tabla 11: Características ensayadas de los gravas.

3.1.4. Aditivo

Se utilizó el mismo aditivo superplastificante, tanto para el hormigón autocompactante como para el de referencia, sólo que en dosis diferentes. Se trataba de un aditivo Grace Mira 42, es un aditivo multifuncional de última generación para plantas de hormigón preparado, para utilizarlo en hormigones de altas resistencias, buena trabajabilidad, excelente reductor de agua. También utilizaba un superfluidificante denominado Chrysofluid Optima 209, sus características se recogen en el Anejo 3.

3.2. DOSIFICACIÓN DE LOS HORMIGONES

Los hormigones del estudio se han dosificado con las mismas materias primas, ya que el autocompactante ha sido suministrado por la empresa Lafarge, con la dosificación que la empresa utiliza para realizar este tipo de hormigón. También en el hormigón convencional se mantenido la dosificación comercial, pero manteniendo la misma relación a/c y la misma cantidad de cemento, con el fin de que las posibles diferencias de porosidad que pudieran detectarse no fuesen atribuibles a variaciones de estos parámetros.



Fig. 40: Central de hormigonado Lafarge y camión del cual se tomó la muestra.

3.2.1. Dosificación del hormigón autocompactante

El hormigón autocompactante que nos facilita Lafarge tiene las siguientes características AGV-35/14/IIb, esta es la tipificación que usan en la citada empresa, que se corresponde con la tipificación de la EHE, HA-35/AC (E2+V2+RB2)/14/IIb

La representación de la granulometría de las fracciones integrantes, grava, arena y filler se representan en la siguiente gráfica. Como referencia se ha representado las curvas ideales de Fuller para una mezcla similar y para una arena.



Fig. 41: Granulometría resultante para la dosificación del HAC

La dosificación de este hormigón es la utilizada y suministrada por la propia central de hormigonado, siendo para cada m³:

Cemento	350 kg.
Agua	182 litros.
Relación agua/cemento	0,52
Filler	153 kg.
Arena (0/4)	1066 kg.
Grava (4/14)	721 kg.
Aditivos: Chrysofluid Optima 209 y Grace Mira 42	2%

Tabla 12: Dosificación del HAC.

En el recinto de la central de hormigonado, se realizan los diferentes ensayos que caracterizan al propio hormigón en su estado fresco. Para reproducir las condiciones de obra se vierte parte del hormigón antes de la toma de muestras para la realización de los ensayos. Detalle muy digno de agradecer por parte de la empresa.



Fig. 42: Toma de la muestra del camión y ensayo de escurrimiento.

3.2.2. Dosificación del hormigón convencional

Basándonos en los datos suministrados por la empresa Lafarge en cuanto a la dosificación que ellos utilizan para realizar el hormigón convencional, se han realizado pequeñas modificaciones en la composición

para poder mantener la misma relación a/c y la cantidad de cemento. No obstante a continuación se muestran tanto, la granulometría de las fracciones como la mezcla resultado del estudio de esta dosificación así como las cantidades de los distintos componentes por m³. Se realiza el ensayo según UNE-EN 933-1=1998 Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.

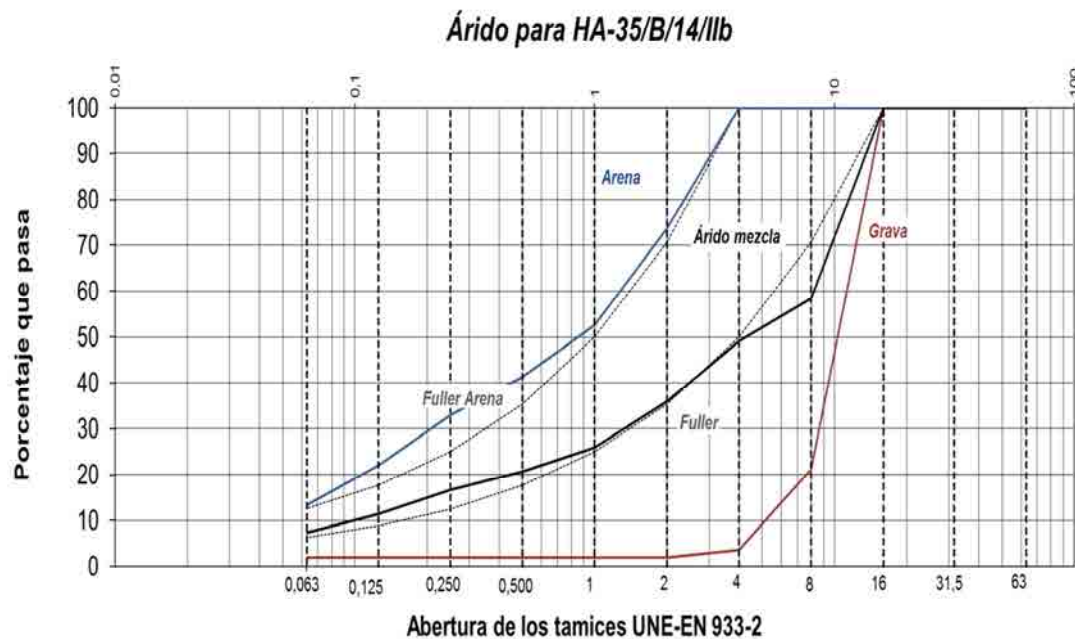


Fig. 43: Granulometría resultante para la dosificación del HV

Como puede observarse se tiene un árido separado claramente en dos fracciones: Una arena 0/4 y una grava 4/14. Para formar la grava global del árido, las fracciones se mezclaron en la proporciones de 47 % de arena y 53 % de grava, ya que la mezcla obtenida con esos porcentajes se ajusta perfectamente a la granulometría de Fuller para el árido grueso de tamaño 12,5.

Como la hormigonera que disponíamos tenía una capacidad de 50 litros, por lo tanto se fue calculando cada proporción de cada componente con el fin de fijar las variables descritas para el estudio, véase figura 44. Por tanto la dosificación final del hormigón vibrado fue:

Cemento	17,5 kg.
Agua	9,1 litros.
Relación agua/cemento	0,52
Arena (0/4)	47 kg.
Grava (4/14)	51,15 kg.
Aditivos: Chrysofluid Optima 209	1%

Tabla 13: Dosificación del HV.



Fig. 44: Pesada de los áridos y preparación en hormigonera.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

La instrucción EHE-08 en su Anejo 17 establece que la caracterización de la autocompactabilidad se realice a través de métodos de ensayo específicos que permitan evaluar las prestaciones del material en términos:

- De fluidez, mediante ensayos de escurrimiento según UNE-EN 12350-8 o por ensayos de escurrimiento en embudo en V, según UNE-EN 12350-9.
- De resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con anillo Japonés, según UNE-EN 12350-12 y mediante ensayos de la caja en L, según UNE-EN 12350-10.
- Y de resistencia a la segregación.

Ante la evidente ausencia de un ensayo que informe sobre las tres características esenciales que poseen los HAC, fue preciso recurrir a todos los métodos de evaluación que propone la EHE-08 para su caracterización.

3.3.1. Métodos de ensayos y criterios de evaluación.

A continuación se describen cada uno de los ensayos normalizados que han servido para caracterizar las propiedades del hormigón estudiado.

Caracterización de fluidez.

Ensayo de escurrimiento UNE-EN 12350-8 = 2011

El primer ensayo que se realizó es el denominado ensayo de escurrimiento. El objetivo de este ensayo es evaluar la habilidad o facilidad de fluir del hormigón. Se puede también valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación, que se manifestaría por la presencia de un halo de pasta o mortero alrededor del perímetro de la extensión del flujo y/o la presencia de áridos gruesos acumulados irregularmente, sobre todo, en el área central de la torta de escurrimiento, como se aprecia en la figura 45.



Fig. 45: Aspecto de la torta en el ensayo de escurrimiento del hormigón.

En este ensayo utilizamos el cono de Abrams, usado para la determinación de la consistencia del hormigón fresco convencional. A diferencia del convencional, en éste, la muestra de hormigón se coloca sin ningún tipo de compactación, no constituyendo el asentamiento una medida representativa y siendo el diámetro final de extensión (D_f) la medida

fundamental que se obtiene como resultado (Fig. 45). También se mide el tiempo de tarda la muestra desde el inicio del levantamiento del cono hasta alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{50}), y más ocasionalmente, el tiempo final de extensión de flujo (T_f), hasta que la muestra deja de moverse.

Nuestro ensayo se realizó directamente en la central de hormigonado, gracias a la colaboración de la empresa Lafrange, nos proporcionaron el hormigón autocompactante, el cual iba destinado a la realización de elementos verticales en una obra enmarcada dentro del proyecto “Campus de la salud”. La empresa, la cual siempre realiza este ensayo a todos los camiones que salen de la central, nos proporcionó la mesa en la cual se realizaron las pruebas. Se hicieron dos pruebas, debido a que en la primera se realizó un poco precipitadamente. Los resultados de ambas pruebas fueron muy similares, como se ve a continuación.

Ensayo de Ecurrimiento		
Ensayos	D_f (cm)	T_{50} (seg)
1º	75	2,02
2º	74	2,22

Tabla 14: Datos del ensayo de escurrimiento realizado en central.

Caracterización de fluidez en presencia de barras.

Ensayo del escurrimiento con anillo Japonés UNE-EN 12350-12=2011

Constituye una variante al anterior ensayo de escurrimiento con la inclusión de otro parámetro denominado coeficiente de bloqueo.

El aparato (Fig.46) consiste en un anillo de 300 mm de diámetro, en el cual se disponen barras verticales de armadura de 100 o 120 mm de altura, con una apropiada separación entre ellas. Normalmente, se considera adecuado el uso de un espacio entre las barras igual o superior a tres veces el tamaño máximo de árido [02]. Respecto a este tema la norma UNE 83.682 especifica una determinada combinación de barras y el espacio entre ellas según el tamaño máximo del árido; colocándose 20 barras de 10 mm de diámetro si el tamaño máximo del árido es menor o igual a 20 mm, y

colocándose 12 barras de 28 mm si el tamaño máximo del árido es mayor que 20 mm. En nuestro caso al ser el tamaño máximo del árido 14 mm se utilizará el anillo con 20 barras de 10 mm.

El procedimiento consiste en realizar el ensayo de escurrimiento dejando fluir el hormigón horizontalmente sobre una superficie plana de manera que tenga que atravesar las barras del anillo para extenderse. Una vez cesa el flujo, se miden las alturas de hormigón justo dentro y fuera del anillo para evaluar el bloqueo. También, se mide el diámetro final del escurrimiento como la media de dos diámetros perpendiculares (Fig. 46).



Fig. 46: Aspecto de la torta en el ensayo de escurrimiento con anillo japonés.

A pesar de que este ensayo combinado con otros mide el flujo y la capacidad de paso, los resultados no son independientes. El flujo medido se ve afectado por el grado en que el movimiento del hormigón está bloqueado por las barras de refuerzo. El alcance del bloqueo se ve mucho menos afectado por las características de flujo y podemos decir que, de manera clara, cuanto mayor sea la diferencia de altura, menor será la capacidad de paso del hormigón.

En cambio, según EFNARC [02] la diferencia entre las alturas en la cara interior y exterior del anillo no debería superar los 10 mm, para considerar un hormigón con buena calidad de paso.

Las prescripciones de la norma [01] no hacen ninguna alusión a la diferencia de altura entre el exterior y el interior del anillo, en cambio, si

prescribe que el diámetro final de la extensión ha de ser mayor o igual al diámetro de la torta obtenido mediante el ensayo de escurrimiento menos 50 mm.

Ensayo de Escurrimiento con Anillo Japonés		
Ensayos	Diámetro (cm)	H1/H2
1º	72-70	7,5-8

Tabla 15: Datos del ensayo de escurrimiento con anillo Japonés.

Determinación del tiempo de flujo.

Ensayo del embudo en V UNE-EN 12350-9=2011

El ensayo tiene como objetivo evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en dirección vertical y bajo su propio peso, cualificando la tendencia a la segregación y al bloqueo, mediante el tiempo de vaciado. El flujo del hormigón al pasar por el embudo, dadas las características de éste (reducción de la sección transversal de salida, Fig. 47), aumentará el riesgo de bloqueo por el contacto entre los áridos gruesos, siendo un indicativo de la necesidad de mejorar la viscosidad o disminuir la propagación de grava.

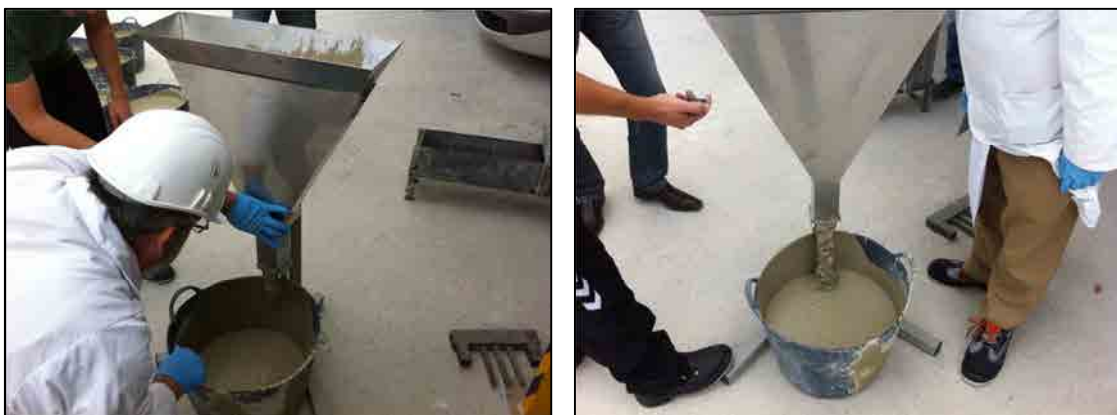


Fig. 47: Aspecto del hormigón en el ensayo del embudo en V.

El embudo tiene forma de V con una apertura en el fondo, donde se coloca una compuerta que ha de ser estanca mientras esté cerrada y, de rápida apertura para interferir lo menos posible en el momento de la descarga.

El ensayo consiste en llenar el embudo con la muestra representativa de HAC de forma continua y si compactación alguna. Seguidamente, se abre la compuerta y en ese instante se comienza a medir el tiempo que tarda el volumen total de hormigón en fluir a través de la apertura (Fig. 47). En algunos casos [03] se ha propuesto medir también el tiempo de flujo dejando reposar la muestra en el embudo durante 5 minutos para valorar la tendencia a la segregación.

El tiempo de flujo en segundos (T_v) es la principal medida obtenida de este ensayo. Según la EHE-08 el valor de esta medida se debe encontrar dentro del intervalo de tiempo de 4 a 20 segundos, ambos incluidos.

Se puede observar también cierta información observando el flujo del hormigón en el vaciado. Un flujo continuo sin interrupción es un indicador de la ausencia de bloqueo y segregación.

Cuando la cantidad y el tamaño de los áridos gruesos son suficientemente pequeños en relación a la apertura del embudo en V, la colisión y la interacción entre las partículas de grava no afectan las características del flujo. Bajo estas condiciones, el tiempo de flujo del embudo permite evaluar indirectamente la viscosidad de la mezcla a través de la fluidez. Si, por el contrario, la cantidad y tamaño de los áridos gruesos son relativamente grandes para el tamaño de la apertura, la interacción entre estos áridos es dominante.

A pesar de que el método se ha mostrado eficiente para evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas, el ensayo no puede cualificar bien la tendencia a la segregación y al bloqueo entre las armaduras. Asimismo, el resultado no refleja la habilidad de fluir en dirección horizontal o contraria a la gravedad. Por lo tanto, el tiempo de flujo obtenido en este ensayo no es suficiente para cuantificar las propiedades necesarias que garanticen las prestaciones del hormigón como autocompactante, por lo que deberá ser complementado con otros. [56]

Caracterización de fluidez. Método de la caja en L UNE-EN 12350-10=2011

Este ensayo permite determinar la capacidad de paso del hormigón autocompactante para fluir a través de aberturas estrechas, incluidos los espacios entre las barras de refuerzo y otras obstrucciones sin segregación ni bloqueo.

El ensayo en si consta de un deposito vertical que conecta con una canal horizontal a través de una abertura en la que se colocan barras de armadura (Fig. 48). El ensayo consiste en llenar el depósito y dejar fluir el hormigón hacia el canal a través de las armaduras determinando el tiempo que tarda el hormigón en llegar a una distancia de 700 mm (T_{70}).

Una vez que el hormigón ha dejado de fluir, se miden las alturas H_1 y H_2 que se alcanzan en ambos extremos de la parte horizontal, con la mezcla ya en reposo. La razón H_2/H_1 se define como la capacidad de paso (PL)



Fig. 48: Aspecto del hormigón en el ensayo de la caja en L.

En cuanto a las características del obstáculo, en general, se acepta que el tipo de barras y los espacios o separación entre ellas varíen dependiendo del tamaño máximo del árido y de las condiciones reales de aplicación del hormigón. Usándose normalmente 3 barras de 12 mm de diámetro, si el tamaño máximo de árido es menor o igual a 20 mm, o 2 barras de 16 mm de

diámetro, si el tamaño máximo del árido es mayor de 20 mm. En nuestro caso como el tamaño máximo del árido es de 14 mm se utiliza 3 barras de 12 mm.

El tiempo medido en la caja en L (T_{70}) cuantifica la velocidad de flujo a través de la barrera. No obstante, cabe reseñar que este tiempo no es representativo de la fluidez del hormigón cuando ocurren efectos de bloqueo, puesto que las mezclas que atraviesan la armadura tienen más pasta que el hormigón retenido en la caja. Por otro lado, la capacidad de paso (PL) es un buen indicador de la habilidad para pasar por aperturas estrechas, que incluye la capacidad de deformación y la resistencia al bloqueo. Según la EHE-08 debería encontrarse entre 0,75 y 1,00 para que se considere satisfactoria la resistencia al bloqueo del hormigón. [01]

3.4.RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

La resistencia a compresión se determina para caracterizar los dos tipos de hormigones estudiados y poder relacionarla con otros parámetros esenciales del estudio, ya que el hormigón no se ha dosificado para obtener una resistencia concreta, sino como ya he indicado, se ha hecho fijando parámetros como la relación a/c, la cantidad de cemento, mismo tipo de árido, aditivo e incluso mismo tipo de cemento para los dos hormigones por igual.

Como se han fijado estos parámetros en los dos tipos de hormigones y además se han sometido al mismo proceso de curado, la resistencia estará condicionada por el grado de compactación de las probetas y la influencia de las cantidades de filler. Y la posible incidencia del aditivo, sobre todo por la cantidad de aire que puede haber incluido.

Para la determinación del ensayo, se han preparado con cada uno de los hormigones, 24 probetas cubicas de 150 mm. Previamente a estas probetas se les ha aplicado un desencofrante de la marca “Sika form” para poder facilitar su desmolde. Las probetas correspondientes al hormigón autocompactante se llenaron en la misma central de hormigonado, de un camión destinado a obra, se desechó una tercera parte del camión, con el fin de coger la muestra de la zona intermedia del camión. Seguidamente se fue vertiendo la cantidad

necesaria para los ensayos en diferentes recipientes con el fin de no paralizar el ritmo de trabajo de la empresa. Las probetas de hormigón autocompactante se llenaron en una tongada, manteniendo la misma altura de caída y sin ningún tipo de compactación forzada adicional. (Fig. 49) Después de realizar el llenado de las probetas de hormigón autocompactante, se dejaron reposar en la central. Transcurridas 24 horas se procedió a recogerlas y traerlas al laboratorio para su desmoldado.



Fig. 49: Proceso de llenado de las probetas de HAC en la central.

Una vez finalizado el llenado de las probetas de hormigón autocompactante se transportaron los áridos, cemento y el aditivo utilizado en el autocompactante hasta el laboratorio en donde realizamos el hormigón convencional vibrado. Para realizar este hormigón se realizó el cálculo de la dosificación necesaria para hacer la cantidad suficiente para llenar las probetas y determinar su consistencia. Se llenaron en dos tongadas compactándolas mediante vibrador de aguja. (Fig. 50)



Fig. 50: Proceso de llenado de probetas de HV.

El curado de las probetas se realizó sumergiéndolas en agua en una cámara húmeda a una temperatura próxima a 20 °C manteniéndolas durante 3, 7 y 28 días, según el plazo en el cual se pretendía determinar la resistencia.



Fig. 51: Cámara húmeda donde se han curado las probetas.

La rotura de las probetas se llevó a cabo en una prensa de compresión (Fig. 52), siguiendo el procedimiento en la norma “UNE-EN 12390-3=2009. Ensayos de hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a compresión de probetas”



Fig. 52: Prensa de rotura

Previamente a la rotura de probetas, se realizó el ensayo de velocidad

de propagación de ultrasonidos, de acuerdo a la norma UNE-EN 12504-4:2006: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.

Entre las pruebas no destructivas se encuentra el uso del equipo ultrasónico. Con esta determinación se pretende comprobar el grado de homogeneidad, entre otras características. Esto se logra a través de mediciones de la velocidad ultrasónica sobre el hormigón que se va a ensayar.

Antes de introducir las probetas en la prensa de rotura, se sacan del agua 24 horas previas al ensayo con el fin de que los poros no estén totalmente saturados, pero no secándolos de forma excesiva para evitar la deformación de la superficie por la consiguiente retracción. Ya que esto puede afectar en la medida de ultrasonidos, una probeta más o menos saturada puede incidir de forma significativa en la transmisión del pulso ultrasónico, ya que la velocidad se incrementará a medida que lo hace el contenido de humedad.

El primer resultado que se obtiene de los datos recopilados es la velocidad de pulso en el elemento que se va a ensayar, la cual se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$\text{Velocidad de Pulso (km/seg)} = \frac{\text{Distancia entre transductores (cm)} * 10}{\text{Lectura de tiempo (microseg)}}$$

La velocidad se determina para las lecturas realizadas a cada elemento y, posteriormente, se obtiene un promedio. A cada probeta se le realizará un ensayo en ambas direcciones, en sentido vertical y en horizontal, las realizadas en sentido opuesto a la dirección de vertido, se obtuvieron medidas en ambos sentidos con el fin de comprobar que exista mucha dispersión de un dato a otro, como se puede ver en la figura 53.

A la par, estas determinaciones se ha realizado simultáneamente a la rotura de compresión, es decir, a la edad de 3, 7, 28 y 45 días.

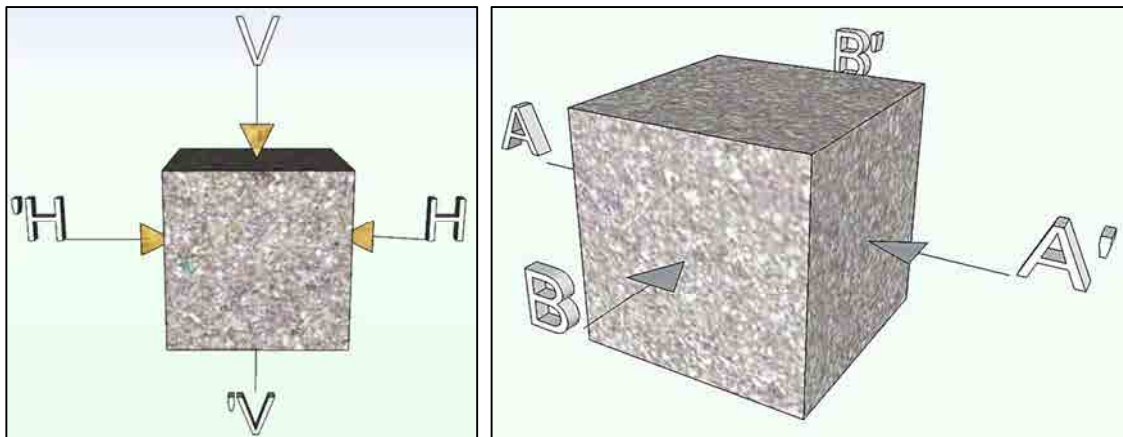


Fig. 53: Toma de datos en ambos sentidos de la probeta

Al depender, tanto la resistencia como la facilidad de propagación directamente de la compacidad de un material se tratarán de establecer la correlación que existe entre ambas para poder utilizarse en posteriores ensayos no destructivos.

Con este dato, podemos determinar la calidad del elemento probado, consultando algunos de los criterios de clasificación de calidad que se muestran en las tablas siguientes:

Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda	
Velocidad de la onda longitudinal m/seg	Condición del hormigón
Más de 4570	Excelente
De 3050 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular a dudosa
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

Tabla 16: Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman.

3.5.DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD

La porosidad juega un papel fundamental en la durabilidad ya que, como se sabe, a través de los capilares progresan los agentes agresivos y en ellos se producen las reacciones con esos elementos, afectando a su vida útil. Por lo tanto, es necesaria su determinación para cubrir los objetivos del trabajo.

3.5.1. Porosidad

La porosidad de la pasta de cemento disminuye con el tiempo debido a los procesos de hidratación. Sin embargo, el volumen de vacíos sigue existiendo en el material, y la distribución de tamaño y la conectividad van a influir en la transferencia de materia en el medio poroso. Según Powers [59] los poros de la pasta endurecida pueden clasificarse en dos distintos grupos que difieren por el tamaño: poros de gel y poros capilares. Existen, además, los poros de aire y, eventualmente, los macroporos atribuibles a defectos de compactación.

Se define como el volumen de ocupan los espacios vacíos (V_v) respecto al volumen total de material (V_t), y se suele expresar en porcentaje:

$$\eta = (V_v / V_t) \times 100$$

Análogamente a la densidad, la porosidad admite ciertas matizaciones y se establecen distintos tipos, siendo los principales la “porosidad global” y la “porosidad abierta”.

La porosidad global (η) se define como la relación del volumen de poros referido al volumen total del material, contabilizándose todos los espacios vacíos presentes. Su determinación se realiza de forma indirecta a partir de la relación existente entre la densidad real y la aparente:

$$\text{Porosidad } (\eta) = 1 - \frac{D_{\text{aparente}}}{D_{\text{real}}}$$

Se tomaron tres probetas de cada tipo de hormigón en las que se determinaron la porosidad y la absorción de agua, con el fin de obtener el volumen de vacíos existente en nuestros hormigones, así como el volumen de

poros accesibles al agua.

Por tanto, para el cálculo de la porosidad es necesario determinar la densidad real para ambos hormigones, la cual se determinará mediante picnómetro, y la densidad aparente empleando la balanza hidrostática para determinar el volumen total.

3.5.1.1. Determinación de la densidad real

Ya que no se dispone de una norma específica para la determinación de la densidad real del hormigón, se calcula en las probetas seleccionadas mediante picnómetro, usando la norma “UNE-EN 1097-7=2009. Determinación de la densidad real del filler. Método del picnómetro” [27] ya que el hormigón fue molturado previamente hasta adquirir el tamaño de un filler.

Para ello, se trocearon y molieron probetas cubicas sobre las que se había determinado su resistencia a compresión con anterioridad, obteniendo una cantidad de muestra inicial de unos 720 gramos, considerada suficientemente significativa, dada la heterogeneidad en la composición del hormigón.

El procedimiento comenzó tras la rotura a compresión de tres probetas de cada tipo de hormigón, se escogieron algunos trozos de la probeta y se trituraron en una machacadora de mandíbulas (Fig. 54), hasta conseguir un buen grado de molido, después se homogeneizó y cuarteó la totalidad hasta obtener una muestra representativa de unos 120 gramos, la cual se introdujo en el molino de Ágata (Fig. 55), hasta que la totalidad de la muestra seleccionada pasó por el tamiz de 0,063 mm.



Fig. 54: Machacadora de mandíbulas.



Fig. 55: Molino Agatha.

Una vez obtenido el material es secado en estufa, se introduce en los picnómetros siguiendo las indicaciones de la citada norma para realizar la determinación por duplicado.



Fig. 56: Introducción de muestra y pesado de picnómetros.

Primeramente se pesan los picnómetros vacíos, después se llenan de agua destilada hasta enrasar, una vez secados se introducen las cantidades de muestra, véase la tabla 15. Tras pesarlos se le añade una pequeña cantidad de agua destilada para después hacerles el vacío. (Fig. 57)



Fig. 57: Llenado con agua para realizar el vacío.

Una vez realizado el vacío se completan con agua hasta enrasar el picnómetro y se realiza una nueva pesada. Con los resultados obtenidos, como se ve en la tabla 15, pasaremos a calcular las densidades.

Picnómetros	Peso en vacio (m_0)	Peso con muestra (m_1)	Peso saturado (m_2)
P1 (HAC)	23,45	48,73	87,03
P2 (HAC)	27,18	53,24	92,42
P3 (HV)	24,99	52,85	90,48
P4 (HV)	36,90	63,52	102,71

Tabla 17: Determinación de Picnómetros

La densidad real del hormigón se obtiene mediante la siguiente formula:

$$\rho_h = [(m_1 - m_0) / V - [(m_2 - m_1) / \rho_1]]$$

donde, para obtener el valor en g/cm^3 :

V = el volumen del picnómetro en cm^3 ;

ρ_1 = la densidad del agua en g/cm^3 ;

m_0 = el peso del picnómetro limpio y seco en g;

m_1 = el peso del picnómetro con la muestra en g;

m_2 = el peso del picnómetro con la muestra y el líquido después del ensayo en g;

3.5.1.2. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente del hormigón, definida como la relación entre la masa en el aire y el volumen total de una muestra, se determinó siguiendo las indicaciones de la norma “UNE-EN 12390-7=2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7. Densidad del hormigón endurecido” [30], en la que se describe el método de ensayo a través de la masa y del volumen aparente de las probetas (Fig. 58).



Fig. 58: Balanza hidrostática para la determinación de la densidad aparente.

La densidad aparente se determinó mediante la fórmula:

$$D_{ap} = m_s / (m_{sat} - m_{sat} \text{ sum} / D_{agua})$$

dónde:

D_{ap} = es la densidad aparente;

m_s = es la masa de la probeta en seco a 105 °C;

m_{sat} = es el volumen total o aparente;

3.5.2. Determinación de la Desorción

Aparte del agua combinada en el hormigón se puede encontrar el agua de gel y el agua alojada en los intersticios capilares y poros. Como el secado del agua de gel es muy lento, por su propia naturaleza y dependiente de la temperatura de secado. Para considerar las muestras secas a 105 °C, el tiempo de secado ha sido el necesario hasta conseguir una diferencia de pesadas del 0,5 %.

Se ha partido de la muestra húmeda y no como la normativa establece, que sería partiendo de la muestra seca, pues la evaporación del agua de gel conlleva tal retracción que origina fisuraciones y por lo tanto altera la estructura inicial del hormigón.



Fig. 59: Probetas saturadas en agua.

La diferencia de peso, expresado como un porcentaje respecto al peso de la muestra seca, es lo que consideramos como desorción de agua. Es decir:

$$De = (m_{\text{sat}} - m_{\text{seco}}) / m_{\text{seco}} \times 100$$

Siendo:

De, la desorción expresada en %;

m_{sat} , el peso de la muestra saturada de agua;

m_{seco} , el peso de la muestra seca.

3.5.3. Determinación de la permeabilidad por agua a presión.

La permeabilidad de un hormigón es la facilidad que presenta este a ser atravesado por un fluido, bien sea líquido o gaseoso, y es consecuencia de la porosidad que posee la pasta hidratada, los áridos y la zona de contacto de la pasta-árido grueso, de una falta de compactación adecuada e incluso de la exudación. La conectividad de los poros junto con su diámetro capilar es lo que determina el mayor o menor avance del frente de penetración en el interior

de la probeta.

El procedimiento según UNE 83309:1990 EX [112], aunque esta norma está derogada, se utiliza ya que el banco de ensayo se hizo conforme a esta norma. A sabiendas de que la actual modifica varios factores del ensayo, entre ellos la temperatura de secado, se continuó con el ensayo debido a que el objetivo principal de este ensayo es ver la diferencia de penetración en los testigos extraídos en sentido vertical y horizontal.

Se inicia con la ejecución y curado de las probetas en agua y tras el decapado de la superficie sobre la que se somete la presión de agua.

Primeramente se realizó la extracción de testigos circulares de las probetas cúbicas, se extrajeron 3 testigos de cada tipo de hormigón, en sentido horizontal y vertical, un total de 12 testigos.

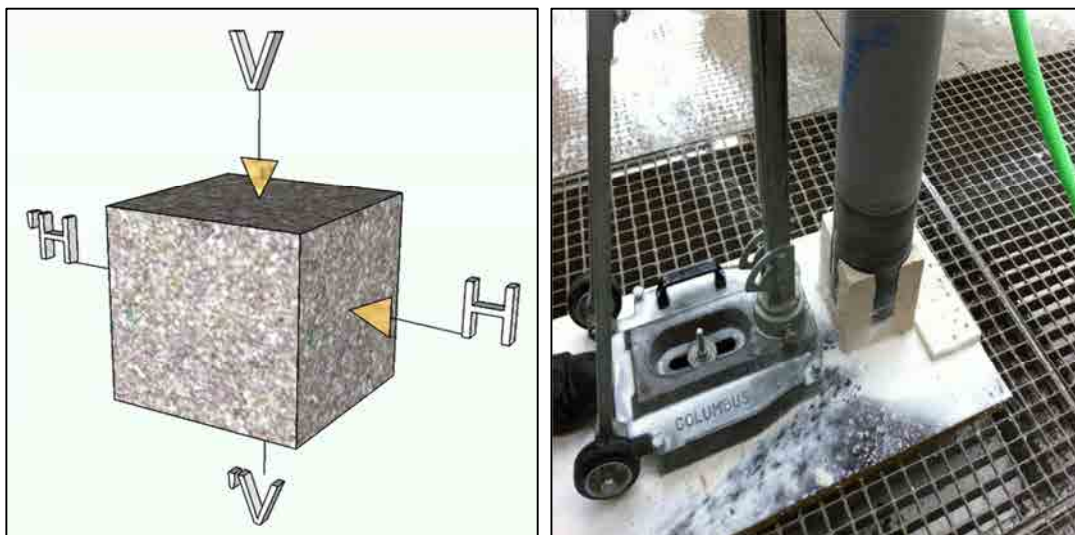


Fig. 60: Extracción de testigos en ambos sentidos de la probeta

Después de secarse durante 1 día en estufa a 110 °C y enfriarse hasta temperatura ambiente, se colocan en un banco de ensayo donde se les aplica el agua a presión a 5 bares durante 24 horas, por la cara inferior de la probeta a la que se le eliminó la capa superficial.

Para determinar el frente de avance del agua se realiza la rotura brasileña rompiendo la probeta en dos mitades de forma que se pueda inspeccionar el frente de penetración de agua.



Fig. 61: Banco de ensayo y rotura a la brasileña.

Una vez rota la probeta, se dibuja el perfil de penetración sobre la probeta para comprobaciones posteriores. A partir de éste, se determina la profundidad máxima y media de penetración. La primera midiendo directamente el valor de penetración mayor y la segunda integrando el área bajo el frente de penetración y dividiéndola por el ancho de la superficie de la probeta ensayada.



Fig. 62: Probetas para la determinación de penetración.

Para medir la profundidad máxima de penetración y dejar constancia de ella, se determinan con fidelidad la profundidad de penetración media, a pesar de las irregularidades de las caras resultantes de la fractura, se calca sobre un acetato el frente dibujado con anterioridad. A partir de ese calco puede reproducirse lo dibujado en el acetato sobre un papel normal el cual se puede

introducir en un escáner, escalarse y calcular las áreas con el Autocad.

Del frente de penetración interesan la profundidad máxima de penetración y la media, determinada a partir del área húmeda delimitada por dicho frente. Que son evaluados mediante Autocad, como se ve en la figura 63.

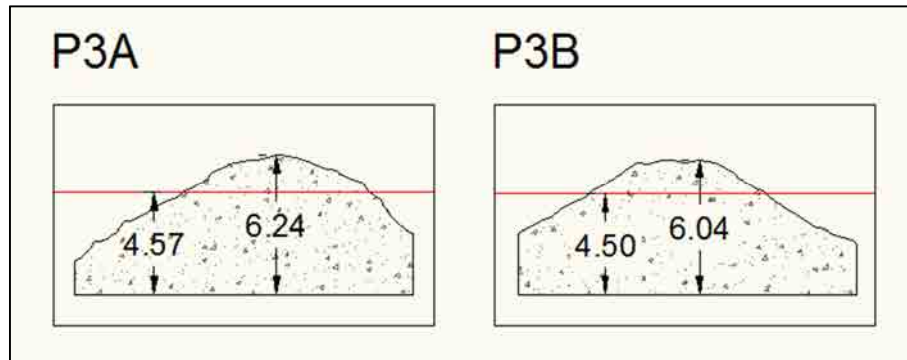


Fig. 63: Medidas y determinación de profundidad máxima y mínima.

En la figura 64, se puede ver todo el sistema necesario para efectuar el ensayo: compresor, calderín con agua a presión y el sistema para aplicar la presión sobre una cara de la probeta, provisto con los reguladores de presión y manómetros necesarios para su comprobación.



Fig. 64: Aparataje y disposición de las probetas para realizar el ensayo.

3.6. CARBONATACIÓN

En este estudio se han considerado los posibles efectos en la durabilidad correspondiente a un ambiente IIb, puesto que las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesta la ciudad de Granada y sus alrededores.

El proceso carbonatación transforma la portlandita en carbonato cálcico, por reacción con el CO_2 atmosférico originando una reducción de la reserva alcalina y una baja del PH del medio y como consecuencia las armaduras embebidas en el hormigón quedan despasivadas, siendo más susceptible de corroerse.

La carbonatación es un proceso que se desarrolla de forma muy lenta en los ambientes naturales, por ello ha sido necesario realizar ensayos de carbonatación acelerada con el fin de intentar comparar en un plazo reducido la susceptibilidad de ambos hormigones.

Pero, como se sabe, la carbonatación puede verse potenciada o acelerada, de forma relevante, bajo dos condiciones ambientales: por un incremento en la concentración de CO_2 y por una humedad relativa media, que garantice la presencia de agua en las paredes capilares, pero que quede parcialmente hueco para que el CO_2 puede penetrar con facilidad, ya que el aire puede disolver mucha más cantidad de CO_2 que en el agua. Evidentemente, para que los resultados puedan ser comparables es imprescindible mantener las mismas condiciones y con la menor fluctuación posible en ambos hormigones simultáneamente.

Por todo ello, basándonos en la norma UNE 83993-1: Durabilidad del hormigón. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido [33] se han dividido las probetas cúbicas en tres partes para poder evaluar cómo se comportan los dos hormigones frente a este agresivo, como se muestra en la Fig. 65



Fig. 65: Probetas cortada para la determinación de la carbonatación.

3.6.1. Descripción de la cámara de CO₂

La cámara está constituida por dos partes diferentes: la primera parte es la propia cámara, donde las condiciones ambientales han de mantenerse constantes y donde se alojan las probetas objeto de ensayo. La segunda parte está formada por los sistemas de control necesarios para regular el caudal de CO₂ que se aporta y los medios para el control de humedad (Fig. 66)



Fig. 66: Cámara controlada de carbonatación acelerada.

La cámara posee una capacidad de unos 1.000 litros, suficientes para que las probetas estén colocadas a una cierta distancia, como apunta la norma, de forma que garantice el flujo de aire a su través y, por tanto, que las condiciones ambientales sean prácticamente las mismas en todas las superficies de las probetas.

La concentración de CO_2 se ha fijado en 1,0 %, de acuerdo con lo que se especifica en la citada norma, siendo este valor muy superior a la presente en el aire natural, que está en torno a 0,03 %, pero necesario para intentar obtener datos significativos en períodos moderados de tiempo.

La concentración de CO_2 en el interior de la cámara se mantiene mediante un dosificador por caudal y tiempo, situado después de una válvula manorreductora, en la que el caudal se regula mediante una llave de aguja y una electroválvula que, de forma automática, se puede abrir unos segundos en intervalos de tiempo prefijados.

La temperatura y la humedad relativa (HR) se miden en dos zonas extremas de la cámara con un medidor de la firma Lexibook modelo MeteoClock SM980 (Fig. 66). Su rango de medida para la temperatura oscila de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una resolución de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una precisión de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, el intervalo de medida de la HR oscila entre el 25 % y el 90%.



Fig. 67: Dispositivo para el control de la humedad y la concentración de CO_2 y probetas alojadas en la cámara

La HR al inicio del ensayo era excesiva ya que las probetas contenían bastante humedad debido tanto al proceso de curado como a la tomada en las

operaciones de corte. Para reducir la HR de las probetas, se dispuso de unos deshumidificadores a base de sales de cloruro de calcio, en distintos puntos de la cámara, consiguiendo así mantener la humedad relativa en torno al 60 %.

3.6.2. Plazos y técnicas de medida.

A los 14 días de curado se cogieron dos probetas de cada tipo de hormigón, la cuales se dividieron en tres partes cada una con el fin de obtener diferentes datos de control de carbonatación. Sobre las 12 muestras resultantes, se han introducido cuatro muestras en la cámara de CO₂, otras cuatro muestras se han dejado en el exterior como referencia y las últimas cuatro de mayor tamaño se han introducido cuando el hormigón ha cumplido los 28 días. Dada la premura para obtener los resultados se opta por introducir a los 14 días, dado que en condiciones normales de obra el curado no suele sobrepasar esta fecha. El resto de probetas que se someterán a este mismo ensayo se han dejado metidas en agua hasta completar los 28 días de curado, para que los resultados obtenidos sean comparables con otros estudios.



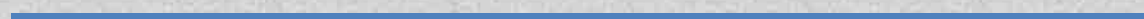
Fig. 67: Probetas expuestas a carbonatación.

Tras la identificación de cada fragmento, se procedió al pintado de las caras superior e inferior con el fin de permitir que la penetración y difusión del CO₂ se produjese sólo por las superficies encofradas tal y como ocurre en un elemento vertical real. La pintura utilizada fue de tipo epoxi al agua.



CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Los resultados experimentales obtenidos en los distintos ensayos realizados y su interpretación se incluyen en los siguientes apartados.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGÓN ESTUDIADOS.

A continuación se presentan una serie de cuadros en los que se recogen las características de todas las amasadas realizadas, tanto las referentes al estado fresco como al endurecido.

En la Tabla 18 se expone la dosificación empleada con las proporciones de los componentes utilizados.

Designación	Cantidades en kg/m ³					
	Agua	Cemento	Filler	Arena	Grava	Aditivo
HAC E2+V2+RB2	182,0	350	153	1066	721	5,7 (2,0 %)
HV IIb	182,0	350	-	917	1023	1,1 (1,0 %)

Tabla 18: Dosificación definitiva de los hormigones ensayados

Con el hormigón autocompactante se realizaron los ensayos pertinentes para caracterizar sus propiedades en estado fresco, cuyos resultados se exponen en la Tabla 19.

Características en estado fresco del HAC								
Amasada	ESCURRIMIENTO		EMBUDO EN V	CAJA EN L			ESCURRIMIENTO CON ANILLO J	
	Diámetro (cm)	T ₅₀ (s)	T _v (s)	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	T ₇₀ (s)	Diámetro (cm)	H1-H2 (mm)
1	74	2,22	4,55	6,7	6,0	2,15	72,0	5,0

Tabla 19: Resultados de los ensayos de autocompactabilidad del HAC confeccionado

Respecto a las características en estado fresco anteriormente indicadas, puede hacerse una clasificación del hormigón autocompactante con los resultados obtenidos en el ensayo de escurrimiento y tomando como referencia los criterios de la Instrucción EHE-08. En la Tabla 20 se indican, además de esta clasificación, otras características del hormigón fresco.

			ESTADO FRESCO			
Tipo de hormigón			Esgurrimiento		Asiento en cono (cm)	Densidad (kg/m ³)
			d _f (mm)	T ₅₀ (seg)		
HAC	Amasadas	1	E2+RB2	AC-V2	-----	2,44
HV		1	----	----	6,0	2,48

Tabla 20: Designación que le correspondería a las distintas amasadas del HAC confeccionadas de acuerdo con los criterios de la EHE-08

Para la rotura a compresión, se han roto en cada ensayo un mínimo de tres probetas de cada tipo de hormigón, curadas en agua. La evolución de la resistencia a compresión del HAC puede considerarse semejante a la del hormigón tradicional. Cabría pensar en la posibilidad de un cierto retraso en el desarrollo de las resistencias debido a la mayor dosis de aditivo empleada pero no se ha observado, al menos, en los plazos en los que se ha determinado. Algunos tipos de aditivo pueden poseer un efecto secundario retardante, pero estos superplastificantes sintéticos de última generación no suelen contener sustancias que retrasen la hidratación, incluso muchos producen un efecto acelerante al permitir mayor dispersión de las partículas de cemento que en su ausencia.

Los valores medios de resistencia a compresión se exponen en la Tabla 21, mientras que en la Figura 69 se representa la evolución de resistencias.

TIPO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)			
	A 3 días	A 7 días	A 28 días	A 45 días
HAC	32,13	37,91	44,81	47,82
HV	37,77	45,23	51,01	53,87

Tabla 21: Valores medios de la resistencia a compresión de ambos hormigones a diferentes edades.

En la siguiente grafica se puede observar la evolución de las resistencias dependiendo del tipo de hormigón ensayado.

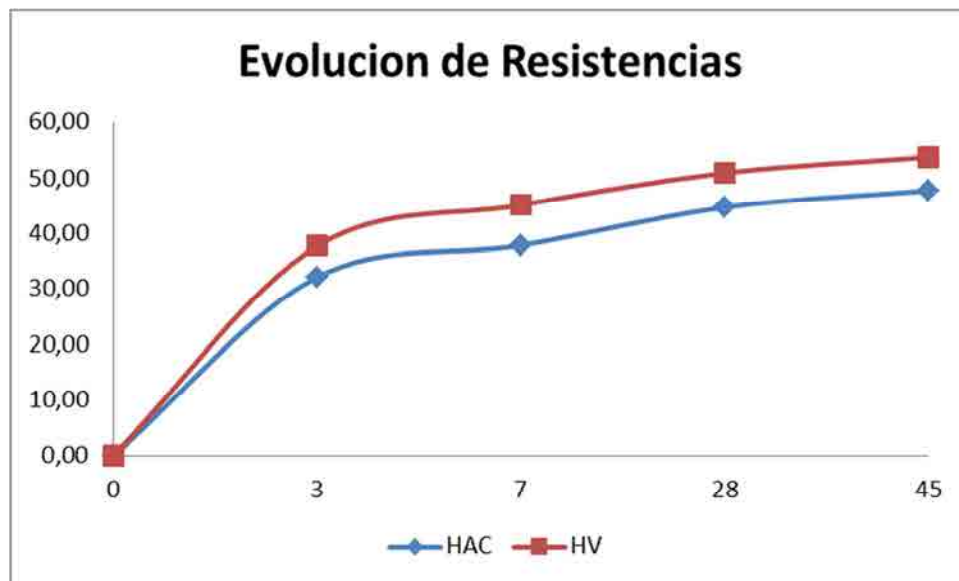


Fig. 69: Valores medios de las roturas a compresión de ambos hormigones a diferentes edades.

Como se puede observar existe una diferencia notable del HV con respecto del HAC, esto puede deberse a varios factores, según Neville [58], opina que para un mismo valor de la relación a/c y unos mismos materiales, la resistencia a compresión debería verse de forma general modificada ligeramente al alza en el caso del autocompactante, dependiendo de la actividad de los fillers utilizados. En nuestro caso el filler puede considerarse inerte, ya que se trata de carbonato cálcico y no cabe esperar un efecto significativo en las resistencias, salvo el de colmatar los poros más pequeños y producir el efecto epitaxico.

Como puede verse, se ha producido una disminución en las resistencias del HAC respecto al HV. Estos resultados difieren con la mayoría de los resultados obtenidos en otras investigaciones en las que los HV obtienen un valor de resistencia menor respecto al HAC, lo cual suele ser debido al uso de una mayor cantidad de cemento para éste y a veces a unas relaciones a/c distintas para cada tipo de hormigón.

4.2. DENSIDADES Y POROSIDAD

Como se indica en el apartado 3.5, el cálculo de la porosidad se ha realizado a través de los valores de las densidades (real y aparente). Los resultados de las determinaciones efectuadas en los dos tipos de hormigón estudiados se exponen a continuación.

4.2.1. Densidades

La densidad real obtenida en ambos hormigones y determinada mediante ensayo con picnómetro se ha ensayado en probetas que con anterioridad se habían sometido a rotura de compresión. Evidentemente, la densidad real no depende de la porosidad y deberá ser un valor fijo para un mismo tipo de hormigón; por ello, se ha obtenido sólo un valor para cada hormigón, si bien como media de dos determinaciones. Los resultados se muestran en la Tabla 22.

Tipo de hormigón	DENSIDAD REAL (kg/m ³)		
	Muestra	pr	Media
HAC	1	2,623	2.652
	2	2,682	
HV	1	2,643	2.647
	2	2,652	

Tabla 22: Valores de densidad real determinada con picnómetro.

Como se puede ver en el siguiente gráfico, la densidad real del HAC es un poco mayor que la del HV.

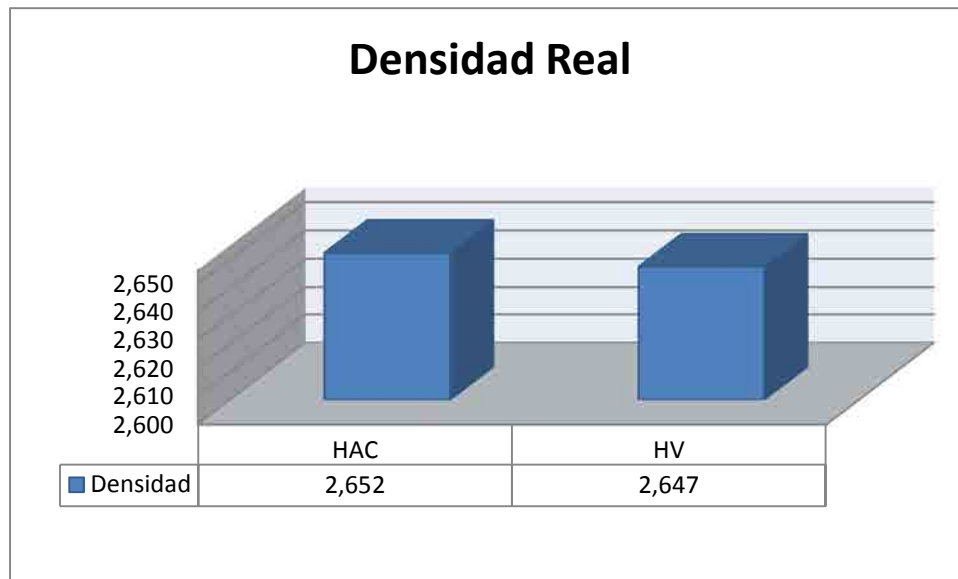


Fig. 70: Valores de densidad real determinada con picnómetro.

La densidad aparente se ha obtenido de las piezas que se habían preparado para intentar determinar el modulo elástico. Los resultados se pueden ver en la tabla.

Probeta	D. Aparente
HAC 01	2,330
HAC 02	2,313
HAC 03	2,349
HAC 04	2,340
HV 01	2,408
HV 02	2,413
HV 03	2,409
HV 04	2,400

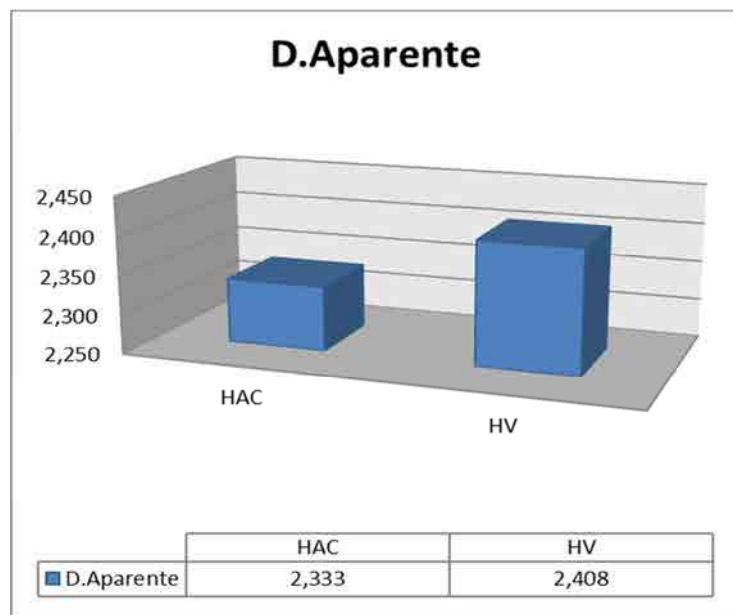


Fig. 71: Densidades aparentes y medias.

En el gráfico pueden observarse mejor las diferencias de densidad aparente entre los dos tipos de hormigón. Como puede verse, las diferencias entre ambos hormigones son solo del orden del 3 % a favor del HV.

4.2.2. Porosidad

La porosidad global se ha evaluado con las densidades obtenidas en el picnómetro y la balanza hidrostática relacionando ambas densidades, como se ha descrito en el apartado 3.5.1.

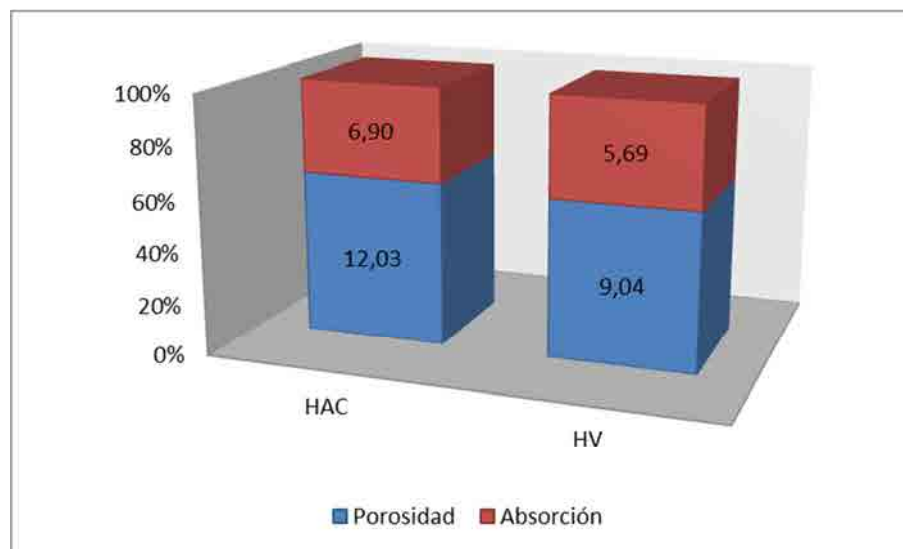


Fig. 72: Comparativa de absorción y porosidad.

En la gráfica se refleja los valores de porosidad y absorción correspondientes al HAC y al HV. En ellas se puede observar que aunque el agua evaporada en el HAC es algo mayor se destaca que en el parámetro de porosidad global si es sensiblemente mayor la porosidad que presenta el HAC frente al HV, prácticamente un 25 % más. Aunque atendiendo a los criterios de Gorisse, puede decirse que las porosidades son las típicas de un hormigón estructural de buena calidad.

La desorción, es decir, el porcentaje de agua evaporable a 100 °C, ha resultado ser del 6.89 en el HAC y 5,70 en el HV. Mientras que las porosidades globales respectivas obtenidas han sido del 12,30 y el 9,40 respectivamente. Se puede resaltar que las diferencias son muchos más significativas en la porosidad que en el volumen desalojado de agua.

4.3. PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN

Como se indica en el apartado 3.5.3, los resultados que se han obtenido en función según la dirección de extracción y tipo de hormigón se puede observar en la graficas siguientes, representándose los valores medios en el cuadro adjunto.

Tipo de hormigón	Dirección de extracción	Profundidad de penetración media	Profundidad de penetración máxima
HAC	Vertical	4,5	6,0
	Horizontal	6,5	7,1
HV	Vertical	4,6	6,0
	Horizontal	5,8	6,1

Tabla 23: Valores de penetración de agua a presión.

Se observa que todos los resultados obtenidos en el HAC, presentan una profundidad de penetración mayor. Los porcentajes que difieren de un hormigón a otro son muy similares, porque las diferencias son poco significativas dada la propia naturaleza del proceso de ensayo.

Lo que si destaca y de forma muy acusada es la relación que existe entre la penetración de agua en sentido horizontal respecto al vertical, siendo el perpendicular a la dirección de llenado mucho más abusada. Algo que era de esperar para todos los hormigones pero quizás no tan destacada como en el caso del HAC.

La rotura a tracción indirecta, ensayo brasileño, ha aportado unos resultados que presentan una gran dispersión no imputable a los hormigones si no a la prensa utilizada, ya que no permitía una correcta orientación y apoyo de las probetas, al no presentar la generatriz del testigo la misma regularidad que el molde torneado de una probeta cilíndrica. Si bien la rotura de las probetas extraídas en posición vertical han sido algo mayores y más homogéneas, debido a la tendencia de orientación del hormigón mediante la vibración y el autocompactado.

4.4. RESISTENCIAS

En contra de las predicciones basadas en los resultados obtenidos en otras investigaciones, las resistencias obtenidas en el HV han resultado ser ligeramente superiores en todas las edades ensayadas. Siendo a 28 días una diferencia de un 13 % mayor en el caso del HV. Como se puede ver en la gráfica siguiente.

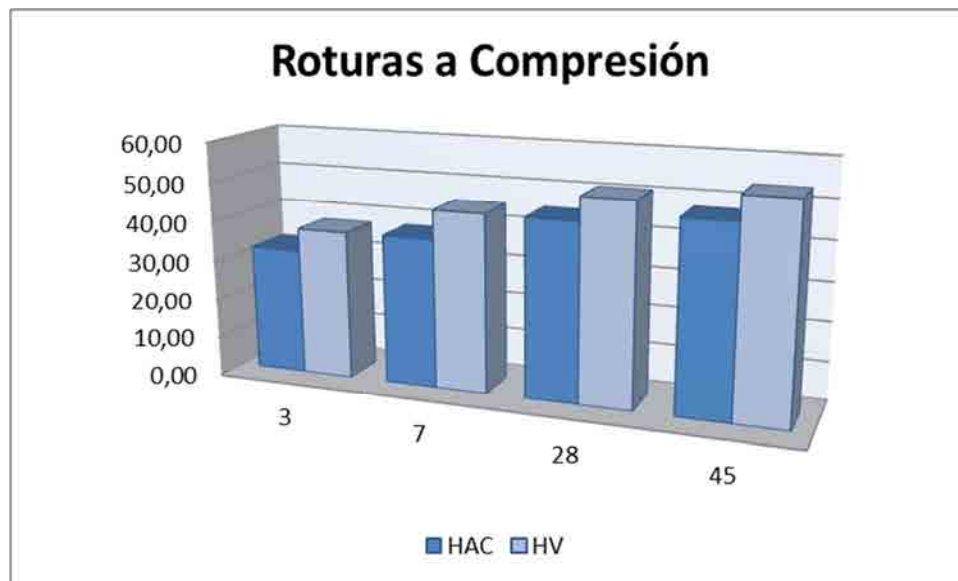


Fig. 73: Evolución de resistencias por edades.

Al ser la misma relación a/c y la misma cantidad y tipo de cemento, la evolución de las resistencias ha seguido la misma tendencia, como era de esperar, aunque siempre el HV, como se puede ver en la gráfica, está siempre por encima

4.5. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

A continuación se muestran los valores obtenidos en este ensayo. Como puede apreciarse no se ha encontrado una tendencia clara acorde con la evolución de las resistencias, no obstante todos los valores se corresponden con hormigones, según la propuesta de Leslie y Cheesman descrita en el apartado 3.4 de este trabajo, de buena y excelente calidad.

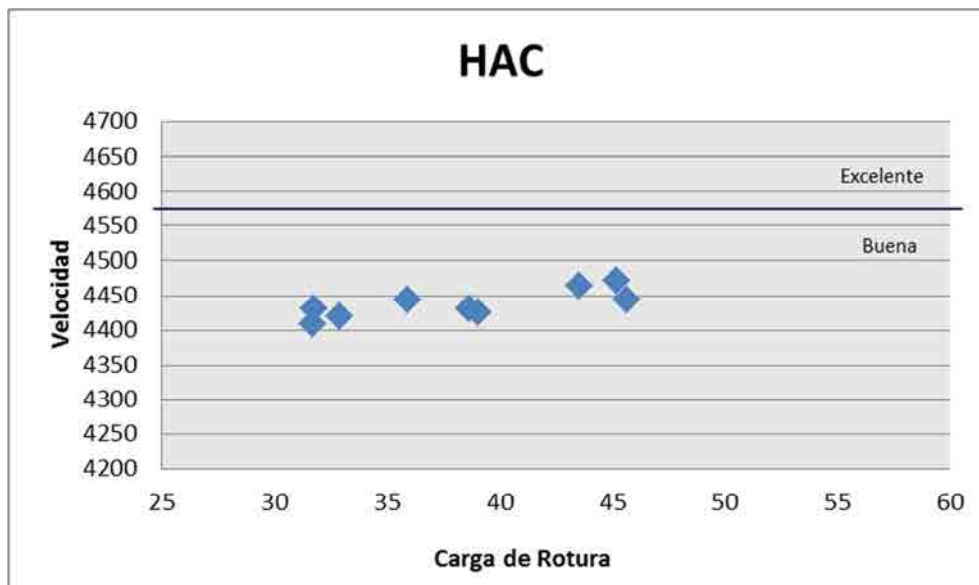


Fig. 74: Relación velocidad de propagación y rotura, en función de la edad.

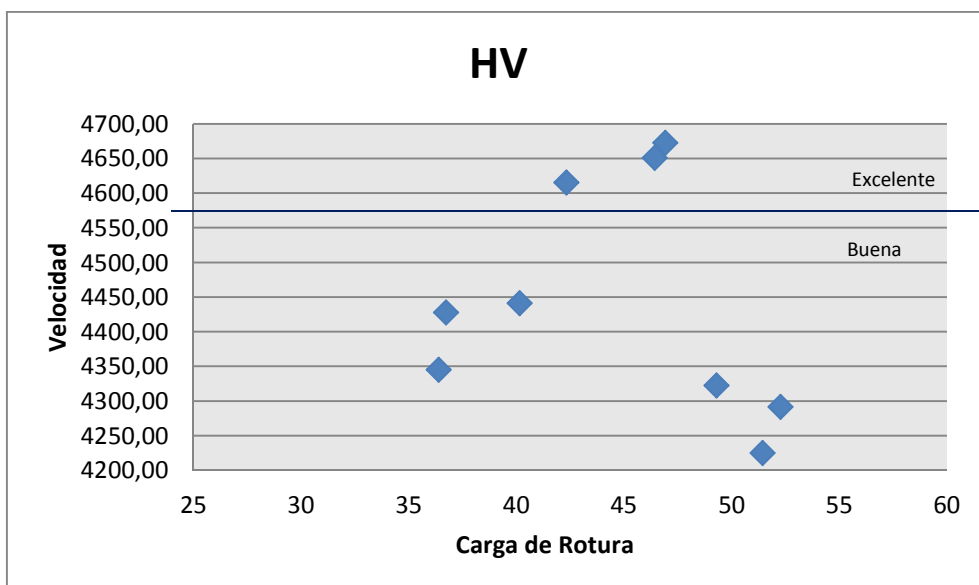


Fig. 75: Relación velocidad de propagación y rotura, en función de la edad.

4.6. CARBONATACIÓN

Como era de esperar la profundidad de carbonatación de las probetas de referencia ubicadas en el exterior, pero bajo techo, todavía no es apreciable dado el corto periodo de exposición. En un futuro, conforme avance la carbonatación seguirán siendo referencia de las sometidas a ensayo en la cámara de carbonatación, a distintas edades. Para ello han vuelto a ser expuestas en las mismas condiciones anteriores.



Fig. 76: Frente de penetración de probetas en cámara de CO₂



Fig. 77: Frente de penetración de probetas en exterior.

Pese al corto periodo de exposición en la cámara de carbonatación, 28 días, como se detalla en el apartado 3.6.1. Se aprecia un frente de carbonatación muy nítido y uniforme en el caso del HAC, mientras que el HV presenta un perfil de penetración mucho más irregular pero este opone una resistencia claramente mayor a dicha penetración.

Se observa que las caras seccionadas se carbonatan siempre en ambos hormigones ligeramente un poco más que las caras moldeadas. Los resultados en esta primera determinación de las probetas situadas en la cámara se exponen en la siguiente tabla.

Probetas	Cara moldeada	Cara cortada
HAC 20	3 mm	3,5 mm
HAC 21	3 mm	3,5 mm
HV 20	2 mm	2,5 mm
HV 21	2 mm	2,5 mm

Tabla 24: Profundidad de penetración de probetas.

La mayoría de las ecuaciones que describen el progreso de la carbonatación del hormigón como función del tiempo, están basadas en las leyes de Fick, tal como se menciona en la EHE, que para el caso que se está tratando toma la forma:

$$x = k \sqrt{t}$$

donde,

x es la profundidad de la carbonatación,

k es el coeficiente de carbonatación y

t es el tiempo.

Los ensayos de carbonatación acelerados se basan en la aplicación de esta ecuación que relaciona la profundidad de penetración de la carbonatación (x) con el tiempo (t). Si se expone una determinada probeta de hormigón a la atmósfera natural, donde la concentración de CO₂ en promedio

es 0,035% molar [60], se obtendrá un tiempo $t_{(0,035\%)}$ necesario para alcanzar la penetración a una profundidad x , si la misma probeta se expone a una concentración exterior de CO_2 mucho mayor (por ejemplo 4% molar), el tiempo necesario para alcanzar esta misma profundidad de carbonatación será aproximadamente 100 veces menor que el anterior.

Habría que matizar que las probetas fueron introducidas en la cámara con tan solo 14 días por lo que todavía no se habían desarrollado totalmente el proceso de fraguado, pudiendo ser por ello que parezcan más vulnerable de lo que en realidad son, puesto que el proceso de fraguado lleva consigo un colmatado de poros. Lo que si se pone de manifiesto es que el HAC, en estas condiciones, presenta un vulnerabilidad 1/3 mayor que el vibrado, con las determinación de la carbonatación de las otras probetas que se introducen a los 28 días de edad, se podrá estimar de forma más adecuada el coeficiente de carbonatación de ambos hormigones.



CAPITULO 5

CONCLUSIONES

En los hormigones estudiados y tras realizar los ensayos pertinentes anteriormente descritos, se puede observar que el HAC posee muy buenas cualidades aunque una menor densidad, esta puede ser atribuible a la mayor incorporación de aire por el aditivo.

Aunque las propiedades reológicas determinadas en los HAC están dentro de los intervalos que evalúan la trabajabilidad, parece que a pesar de ello, como lo demuestran los ensayos de permeabilidad, existen indicios de segregación en ambos hormigones, siendo estas más acusadas en los HAC.

La menor densidad aparente del HAC podría atribuirse a la posible inclusión de aire por el aditivo, que forma parte de su formulación. (No pudo cuantificarse este parámetro en el momento de la toma de muestras)

La porosidad de forma inversa a la densidad, ha resultado ser mayor en el HAC pese haberse mantenido la misma relación a/c y la cantidad de cemento. Podría atribuirse a que en la dosificación de éste, la proporción de arena es mayor y aporta más finos (en torno al 14 %) de calidad media-baja, tal y como lo confirma su alta adsorción de azul de metileno y de incorporarle más cantidad de finos.

Como el diámetro capilar influye menos en la difusión del CO₂ que en la penetración de líquidos, al presentar una mayor porosidad aunque sea de menor tamaño capilar, ha presentado un mayor avance de la carbonatación en torno al 25 % superior que el HV.

Si evaluamos de forma simultánea la capacidad de secado con las porosidades de uno y otro hormigón, el HAC ha presentado una tendencia ligeramente mayor en la retención de agua, quizás por un afinamiento del grano por la incorporación de mayor proporción de filler junto con la mayor colmatación de los capilares. Esta retención es del orden de un 6 %.

Parece confirmarse este afinamiento ya que pese a presentar una porosidad un 25 % mayor, la profundidad de penetración media vertical no difiere más de 0,1 mm entre ambos hormigones, que supone un 2 % de diferencia.

Sin embargo si se analizan las diferencias en las profundidades de penetración entre ambos hormigones, cuando se efectúa el ensayo en sentido vertical u horizontal, se destacan diferencias significativas, un 44 % superior en el HAC frente a un 26 % en el HV. Lo que podría interpretarse como consecuencia de la existencia de segregación en ambos hormigones. Uno por falta de robustez y asentamiento o estratificación de los áridos y en el otro por hipervibrado.

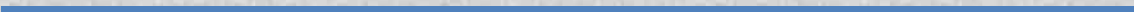
Las profundidades de penetración han resultado ser muy inferiores a la de otros hormigones similares, ensayados de esta manera acelerada, ya que al no ser requerida esta exigencia para este tipo de hormigones no se ha pretendido evaluar estrictamente este parámetro si no que ha sido un método indirecto para establecer las posibles diferencias en los sentidos normal y transversal, para magnificar la posible segregación.

No se ha encontrado una correlación clara y evidente entre la velocidad de propagación de ultrasonidos y la resistencia mecánica. Ni tampoco se ha observado diferencias en función a la dirección de la toma de medida, por lo que no ha contribuido a evaluar la homogeneidad del hormigón.



CAPITULO 6

FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN



Como futuras líneas de investigación, se puede decir, indagar en estrategias para diagnosticar la falta de homogeneidad en la pasta para evitar segregaciones y exudaciones.

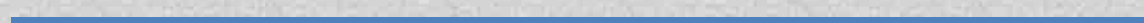
Buscar correlación entre la velocidad de propagación de ultrasonidos, densidad, resistencia y modulo elástico.

Se propone la búsqueda de la mejora para la evaluación ocular directa del ensayo de penetración por agua a presión.

Con respecto a la carbonatación, comprobar realmente la influencia que tiene la cantidad de finos en el hormigón como valor contraproducente.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [01] EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural. R.D. 1247/2008. España 2008.
- [02] EFNARC., Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante: especificaciones, dosificación y uso. 2006. www.efnarc.org
- [03] EFNARC., Specification and guidelines for self-compacting concrete. 2002. www.efnarc.org
- [04] Domone, P.L.; "Self Compacting Concrete: An analysis of 11 years of case studies" Cement and Concrete Composites, nº 28, 2005.
- [05] Khayat, K.H., Saric-Coric, M., Liotta, F.: "Influence of thixotropy on Stability Characteristics of Cement Grout and Concrete", ACI material Journal, Vol. 99, 2002.
- [06] Barragán, B.E., Pacios A., A. Serna R., (Ed); Hormigón Autocompactante (HAC). Primer Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. 18-19 febrero, Valencia, España.
- [07] Shah, S.P. et al (Ed.); Proceedings of First North American Conference on the design and use of Self-Compacting Concrete. November 12-13, Evanston, Illinois. 2002
- [08] Shah, S.P. et al (Ed.); Second North American conference on the Design and use of Self-Consolidating Concrete. SCC 2005, Northwestern University. Evanston, Illinois, 2005.
- [09] Skarendhal, A., Perersson, O.; "Self compacting concrete. State of the art". Report nº 23 of RILEM Technical Committee 174 SSC, Stockholm. 2000
- [10] Zhiwu Yu et al.. 1º International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete. China. 2005.
- [11] Bermejo Núñez, F. B., Gálvez Ruiz, J. C., Moragues Terrades, A., Fernández Cánovas, M.; "Influencia de la estructura porosa en la durabilidad de

hormigones autocompactantes con propiedades mecánicas similares.” Madrid, España. 2009.

[12] Bermejo E. B; “Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación.” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España. 2009.

[13] Boel, V., Audenaert, K., De Schutter, G.; “Characterization of the microstructure of self-compacting concrete”. 11º Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials. Portugal. 2007.

[14] Zhu, W. y Bartos, P.J.M.; “Permeation properties of self-compacting concrete”. Cement and Concrete Research, V.33, pp 921-926. 2002.

[15] Mingorance, R., Rodríguez, J.; Estructura interna de los hormigones autocompactantes relacionada con su durabilidad en un ambiente IIb. Efectos de la puesta en obra. Máster en Ingeniería Geológica aplicada a la obra civil, Universidad de Granada. 2008.

[16] Valcuende, M. O., Parra, C., Benlloch, J.; “Permeabilidad porosidad y resistencia a compresión de hormigones autocompactantes”, Materiales de Construcción Vol. 55, nº 280, España. 2005.

[17] Valcuende, M. O., Parra, C., Jarque, J. C.; “Homogeneidad de los hormigones autocompactantes”, Materiales de construcción Vol. 57, nº 287, España. 2007.

[18] Garrido, L.; “Hormigón autocompactante: materiales, dosificación, propiedades y puesta en obra”. IECA. 2003.

[19] Olivares, M., Laffarga, J., Galán, C., Nadal, P.; “Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad”, Materiales de Construcción, Vol. 54, nº 273, España. 2004.

[20] UNE-EN_12350-8=2011. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8. Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.

- [21] UNE-EN_12350-12=2011.Ensayos de hormigón fresco. Parte 12. Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés.
- [22] UNE-EN_12350-9=2011.Ensayos de hormigón fresco. Parte 9. Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V
- [23] UNE-EN_12350-10=2011.Ensayos de hormigón fresco. Parte 10. Hormigón autocompactante. Método de la caja en L.
- [24] UNE 83.309.90, UNE EN 12390-8:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión y criterios de la EHE-08.
- [25] UNE-EN_12390-7=2009.Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7. Densidad del hormigón endurecido.
- [26] UNE EN 12390-3, Curado, refrentamiento y ensayo a compresión de una probeta cilíndrica de 15x30 cm.
- [27] UNE-EN 1097-7:2009. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 7: Determinación de la densidad real del fíller. Método del picnómetro.
- [28] UNE-EN_12350-7=2010.Ensayos de hormigón fresco. Parte 7. Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.
- [29] UNE-EN_12390-3=2009.Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3. Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [30] UNE-EN 12.390-7: Ensayos de hormigón endurecido. Densidad del hormigón endurecido.
- [31] UNE-EN 12.620/AC: 2004. Áridos para hormigón.
- [32] UNE-EN 12390-6: 2001 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.
- [33] UNE 83993-1: Durabilidad del hormigón. Determinación de la velocidad

de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido.

[34] UNE-EN 933-1: 1998/A1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.

[35] Zerbino, R., Barragán, B., Agulló, L., García, T. y Gettu, R.; “Reología de hormigones autocompactables”. Universidad Politecnica de Catalunya. 2006.

[36] Gettu, R., Gomes, C.P., Bernad, C.; “Hormigones autocompactantes. Desarrollo y caracterización”. V Simposio sobre aditivos, adiciones y tratamientos especiales para hormigones y morteros. Madrid. 2001.

[37] C.E.B.: Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño C.E.B. Traducción por el Geho. Boletín nº12 del Geho. Madrid, 1993.

[38] Petterson, O.: “Limestone powder as filler in self-compacting concrete-frost resistance, compressive strength and chloride diffusivity”. Proceedings of First North American Conference on the design and use of Self-Compacting Concrete. Center for Advanced Cement based materials. Evaston, Illinois. 2002.

[39] Holschemacher, K., Klug, Y.; “A data base for the evaluation of hardened properties of SCC”. LACER: Leipzig Annual Civil Engineering Report, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie. Leipzig (Alemania), nº 2. 2007.

[40] Agranti Landsberger, G.: “Estudio sobre la aplicabilidad de los modelos de cálculo de fluencia y retracción al hormigón autocompactable”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 2008.

[41] Giraldo, M., Manuel Alejandro. “Mineralogical evolution of portland cement during hydration process”. Dyna revista facultad nacional de minas, vol. 73, Nº 148, pp. 69-81, Medellin, 2006.

[42] Metha, K. P., Monteiro, P.J.M.; *Concrete*. McGraw Hill. 2005.

- [43] Rodríguez Montero, J., Piqueras Sala, J.L.: "Propiedades del material en sus estados fresco y endurecido". I curso de Tecnología del Hormigón. IECA. Granada, España, 2004.
- [44] ACHE. Monografía nº 13. Hormigón Autocompactante. Diseño y Aplicación. ACHE, Madrid, España. 2008.
- [45] Garrido Romero, L.; "Comportamiento del Hormigón Autocompactante en estado endurecido. Caracterización de propiedades mecánicas y análisis de durabilidad". I curso tecnología del hormigón. IECA. Granada, España, 2005.
- [46] Bermejo Núñez, F. B., Gálvez Ruiz, J. C., Moragues Terrades, A., Fernández Cánovas, M.; "Permeabilidad y Porosidad en hormigones." Anales de mecánica de Fractura. Nº25, Vol. 2, España. 2008.
- [47] Assié, S., Escadeillas, G., Waller, V.: "Estimates of Self-Compacting Concrete potencial durability". Construction and Building Materials, nº 21, Francia, 2007.
- [48] Boel, V., Audenaert, K., De Schutter, G.; "Characterization of the Pore Structure of Hardened Self-Compacting Cement Paste". 12th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). Canada. 2007.
- [49] Audenaert, K., Boel, V., De Schutter, G.; "Carbonation of Filler Type Self-Compacting Concrete". 12th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). Canada.
- [50] Zhu, W., Gibbs, J.C., Bartos, P.J.M.; "Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements". Cement and Concrete Composites, Nº 23, pp 57-64. U. K. 2001.
- [51] Valcuende, M.O., Parra, C., Jarque, J.C.: "Homogeneidad de los hormigones autocompactantes". Materiales de Construcción. Vol. 57, 287. Pp. 37-52. España, 2007.
- [52] Hoffmann, C., Leemann, A.: "Homogeneity of structures made with self-compacting concrete and conventional concrete". 3rd International Rilem

Symposium on self-compacting concrete, pp. 619-627. Reykjavik, 2003.

[53] RC-08, Instrucción para la recepción de cementos. R.D. 956/2008. España. 2008.

[54] Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi M.: "Self Compacting Concrete" Structural Concrete. Vol. 1, nº 1, pp 3-17. 1986.

[55] Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi M.: "Self-Compacting Concrete" Journal of Advance Technology. Vol. 1, nº 1, pp 3-17. 2000.

[56] Bravo Sobrino, M.: Caracterización y utilización del hormigón autocompactable. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2004.

[57] Aligizaki, K.K.: "Pore Structure on Cement-Based Materials". Abingdon. Oxford, 2006.

[58] Neville, A. M.: "Properties of concrete". 4ª edición. ED. Logman, 1995.

[59] Powers, T.C., "Stucture and physical properties of hardened Portland cement pastes" , J. American Ceramic Society, 41 (1), 1-6 (1958).

[60] Douglas, L., Sánchez, M.: "Construction, operation and performance of a chamber for tests of accelerated carbonation". Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 2003.



TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

Tabla 01: Clasificación de las adiciones utilizables en el HAC

Tabla 02: Granulometría del filler según UNE-EN 12.620/ AC: 2004 y EHE-08

Tabla 03: Valores mínimos y máximos de los componentes del HAC según EFNARC.

Tabla 04: Ensayos tecnológicos para caracterizar la autocompactabilidad

Tabla 05: Clases generales de exposición relativas a la corrosión de armaduras.

Tabla 06: Clasificación de los poros contenidos en la pasta de cemento de acuerdo con la terminología de la ciencia del hormigón y su correspondencia con la tipología de la IUPAC.

Tabla 07: Clases de escurrimiento según la EHE.

Tabla 08: Clases de viscosidad según EHE.

Tabla 09: Clases de resistencia al bloqueo según EHE-08.

Tabla 10: Características ensayadas de los arenas.

Tabla 11: Características ensayadas de los gravas.

Tabla 12: Dosificación del HAC.

Tabla 13: Dosificación del HV.

Tabla 14: Datos del ensayo de escurrimiento realizado en central.

Tabla 15: Datos del ensayo de escurrimiento con anillo Japonés.

Tabla 16: Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman.

Tabla 17: Determinación de Picnómetros

Tabla 18: Dosificación definitiva de los hormigones ensayados

Tabla 19: Resultados de los ensayos de autocompactabilidad del HAC confeccionado

Tabla 20: Designación que le correspondería a las distintas amasadas del HAC confeccionadas de acuerdo con los criterios de la EHE-08

Tabla 21: Valores medios de la resistencia a compresión de ambos hormigones a diferentes edades.

Tabla 22: Valores de densidad real determinada con picnómetro.

Tabla 23: Valores de penetración de agua a presión.

Tabla 24: Profundidad de penetración de probetas.

FIGURAS

Fig. 01: Puente del Dragón (Sevilla)

Fig. 02: Efecto estérico de los superplastificantes.

Fig. 03: Proporciones en volumen de los componentes del HAC.

Fig. 04: Mecanismo para la obtención de la autocompactabilidad, según Okamura.

Fig. 05: Comparación de las proporciones entre el hormigón convencional y el hormigón autocompactante.

Fig. 06: Esquema del procedimiento de diseño de hormigón autocompactante según la UPC.

Fig. 07: Comportamiento reológico de un hormigón según el modelo de Bingham.

Fig. 08: Influencia del contenido de agua, finos y aditivos en el HAC

Fig. 09: Comparación de los parámetros reológicos entre el HAC, el HV y el hormigón fluido.

Fig. 10: Tensión de flujo frente a viscosidad para diferentes tipos de hormigones.

Fig. 11: Factores que influyen en la docilidad

Fig. 12: Equipamiento del ensayo de extensión de flujo.

Fig. 13: Equipamiento de ensayo anillo japonés.

Fig. 14: Dimensiones del embudo en V

Fig. 15: Caja en L.

Fig. 16: Equipamiento de ensayo caja en U.

Fig. 17: Caja de relleno y dimensiones.

Fig. 18: Dimensiones del ensayo de Orimet.

Fig. 19: Dimensiones del ensayo de tubo en U.

Fig. 20: Evolución de la resistencia a compresión relativa a los 28 días de diversos HAC.

Fig. 21: Evolución de la resistencia a compresión en función de la relación

agua/conglomerante de las mezclas de HAC.

Fig. 22: Diagrama tensión deformación del árido, de la pasta y del hormigón.

Fig. 23: Retracción media de (1) HV; (2) HAC con reductor de retracción; (3) HAC.

Fig. 24: Definición de la fluencia bajo tensión constante.

Fig. 25: Influencia de la relación agua/cemento en la fluencia.

Fig. 26: Composición volumétrica de la pasta de cemento hidratada en función del grado de hidratación para dos relaciones a/c.

Fig. 27: Influencia en la permeabilidad en función de la relación a/c y el tiempo de curado.

Fig. 28: Representación esquemática de la zona de transición pasta-árido, según Monteiro y Mehta.

Fig. 29: Efecto del tamaño y forma de los granos del árido sobre la acumulación de agua y en las zonas inferiores de la interfase pasta-árido de cemento.

Fig. 30: Diagrama de Pourbaix hierro-agua y condiciones reales del acero embebido en el hormigón.

Fig. 31: Influencia de la humedad relativa sobre la profundidad de carbonatación para una relación a/c de 0.8 (1) y 0.6 (2).

Fig. 32: Crecimiento de la carbonatación para hormigón con tres relaciones a/c diferentes, curados a 20° C y en un ambiente con un 50% de HR.

Fig. 33: Influencia del contenido de humedad sobre el riesgo de corrosión en relación con el recubrimiento.

Fig. 34: Áridos usados para la fabricación de los hormigones.

Fig. 35: Proceso de lavado de la grava.

Fig. 36: Proceso de cuarteo de la grava.

Fig. 37: Ensayo de equivalente de arenas.

Fig. 38: Ensayo de Azul de Metileno.

Fig. 39: Arena tras realizar el ensayo con el cono.

Fig. 40: Central de hormigonado Lafarge y camión del cual se tomó la muestra.

Fig. 41: Granulometría resultante para la dosificación del HAC

Fig. 42: Toma de la muestra del camión y ensayo de escurrimiento.

Fig. 43: Granulometría resultante para la dosificación del HV

- Fig. 44:** Pesada de los áridos y preparación en hormigonera.
- Fig. 45:** Aspecto de la torta en el ensayo de escurrimiento del hormigón.
- Fig. 46:** Aspecto de la torta en el ensayo de escurrimiento con anillo japonés.
- Fig. 47:** Aspecto del hormigón en el ensayo del embudo en V.
- Fig. 48:** Aspecto del hormigón en el ensayo de la caja en L.
- Fig. 49:** Proceso de llenado de las probetas de HAC en la central.
- Fig. 50:** Proceso de llenado de probetas de HV.
- Fig. 51:** Cámara húmeda donde se han curado las probetas.
- Fig. 52:** Prensa de rotura
- Fig. 53:** Toma de datos en ambos sentidos de la probeta
- Fig. 54:** Machacadora de mandíbulas.
- Fig. 55:** Molino Agatha
- Fig. 56:** Introducción de muestra y pesado de picnómetros.
- Fig. 57:** Llenado con agua para realizar el vacío.
- Fig. 58:** Balanza hidrostática para la determinación de la densidad aparente.
- Fig. 59:** Probetas saturadas en agua.
- Fig. 60:** Extracción de testigos en ambos sentidos de la probeta
- Fig. 61:** Banco de ensayo y rotura a la brasileña.
- Fig. 62:** Probetas para la determinación de penetración.
- Fig. 63:** Medidas y determinación de profundidad máxima y mínima.
- Fig. 64:** Aparataje y disposición de las probetas para realizar el ensayo.
- Fig. 65:** Probetas cortada para la determinación de la carbonatación.
- Fig. 66:** Cámara controlada de carbonatación acelerada.
- Fig. 67:** Dispositivos para el control de la humedad y la concentración de CO₂
- Fig. 68:** Probetas expuestas a carbonatación.
- Fig. 69:** Valores medios de las roturas a compresión de ambos hormigones a diferentes edades.
- Fig. 70:** Valores de densidad real determinada con picnómetro.
- Fig. 71:** Densidades aparentes y medias.
- Fig. 72:** Comparativa de absorción y porosidad.
- Fig. 73:** Evolución de resistencias por edades.
- Fig. 74:** Relación velocidad de propagación y rotura, en función de la edad.
- Fig. 75:** Relación velocidad de propagación y rotura, en función de la edad.

Fig. 76: Frente de penetración de probetas en cámara de CO₂

Fig. 77: Frente de penetración de probetas en exterior.



ANEJOS

Anejo 1

CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO UTILIZADO



Dirección de Calidad

Análisis medio del cemento: CEM I 42,5 R Fábrica de Gádor
(Fábrica Integral de Gádor)
Período del 1 de Septiembre de 2007 al 30 de Septiembre de 2007

1.- Características Químicas.

Pérdida al fuego (P.F.).....	2,8	%
Residuo insoluble (R.I.).....	1,2	%
Trióxido de Azufre (SO ₃).....	3,3	%
Cloruros.....	0,02	%

2.- Características Físicas.

Inicio de fraguado.....	159	min.
Fin de fraguado.....	225	min.
Expansión (Agujas de Le Chatelier).....	1	mm.

3.- Características Mecánicas.

Resistencia a Compresión: 2 Días.....	30,0	N/mm ²
7 Días.....	44,4	N/mm ²
28 Días (*)...	54,8	N/mm ²

Comentarios.
 Este cemento posee el Marcado CE, por el Organismo Notificado 0099 AENOR, siendo su N° de Certificado de Conformidad CE: 0099/CPD/A33/0239
 Además, está en posesión de la Certificación AENOR de cemento, con la marca N de producto Certificado.


(*) Corresponde al mes anterior




 Holcim (España) S.A.
 Director de Calidad
 Fdo: Rafael García Carreto

ANEJO 2

CARACTERISTICAS DEL FILLER

	Hoja de Seguridad Treated - FL	5-mda USPL_0004sp versión: 13 página: 1 / 3 válido: 17-2-2011
---	---	--

SECCION 1 – INFORMACION DEL PRODUCTO

Producto: Carbonato de Calcio (Mármol, Caliza)

Usos del Producto: Carga mineral y pigmento

Nombre Químico: Primeramente CaCO_3

Nombre Comercial: Betocarb® FT - FL	Omycarb® FT HS - FL	Omyfilm® 707 - FL	Omyapro 90 T - FL
Betocarb® Plus - FL	Omycarb® UFT - FL	Omyfilm® 735 - FL	
Hydrocarb® UFT Extra - FL	Omycarb® 3 T - FL	Omyfilm® 780 - FL	
Omycarb® FT - FL	Omycarb® 50 T - FL	Omyapro 80 T - FL	

Proveedor: Omya Inc.

Dirección: 9967 Carver Road, Suite 300, Cincinnati, OH 45242

Teléfono: (513) 387-6800

Emergencias: (800) 424-9300 (CHEMTREC)

SECCION 2 – IDENTIFICACION DEL PRODUCTO

Ingredientes:	WT % (típico) :	CAS #:	Límites de Exposición (TWA) mg/m ³ :	
Carbonato de Calcio	> 97	1317-85-3	ACGIH:	Polvo inhalable, 10 (para PNIOS)
			OSHA PEL:	Polvo respirable, 3 (para PNIOS)
				Total Polvo, 15
				Polvo respirable, 5
Acido Estéarico	< 3	57-11-4	ACGIH TLV:	Polvo total, 10 (para estearatos)
(Conversión parcial a estearato de calcio)				
Sílice, cuarzo	0.2	14808-80-7	ACGIH TLV:	Polvo respirable 0.025
(Componente que se encuentra naturalmente en CaCO_3)			OSHA PEL:	Polvo total 50 / % sílice <2
				Polvo respirable 10 / % sílice <2

SECCION 3 – PROPIEDADES FISICAS

Apariencia y olor: Polvo blanco; sin olor.

Densidad: 2.7 g/ml

Solubilidad en agua: 1.3 mg/100 g @ 18°C

SECCION 4 – RIESGOS DE FUEGO O EXPLOSION

Punto de combustión: No inflamable.

Procedimientos especiales para el combate de incendios: ninguno

Peligros de incendios y explosiones inusuales: ninguno

ANEJO 3

CARACTERISTICAS DEL FLUIDIFICANTE

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

CERTIFICADO DE CONFORMIDAD C E

EC Certificate of conformity

0099/CPD/A45/0011

2010-06-04
Pg.1/3

En virtud del Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, modificado por el Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se dictan disposiciones para la aplicación de la directiva 89/106/CEE del Consejo de las Comunidades Europeas, de 21 de diciembre de 1988, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción, se ha verificado que el

In application of the Royal Decree 1630/1992 of 29 December 1992, as amended by Royal Decree 1328/1995 of 28 July 1995, relative to the application of the directive 89/106/EEC of the Council of European Communities of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to the construction products (Construction Products Directive), it has been stated that the

Producto: **ADITIVOS PARA HORMIGONES, MORTEROS Y PASTAS. ADITIVOS PARA HORMIGONES**
Product **ADMIXTURES FOR CONCRETE, MORTAR AND GROUT. CONCRETE ADMIXTURES**

Referencias: **ver anexo**
References: **see annex**

Norma: **UNE-EN 934-2:2002 (EN 934-2:2001)**
Standard: **UNE-EN 934-2:2002/A1:2005 (EN 934-2:2001/A1:2004)**
UNE-EN 934-2:2002/A2:2006 (EN 934-2:2001/A2:2005)

Suministrado por: **CHRYSO ADITIVOS, S.A.U.**
Supplied by **CM DE YUNCLILLOS, S/N**
45520 VILLALUENGA DE LA SAGRA (Toledo - ESPAÑA)

Fabricado en: **CM DE YUNCLILLOS, S/N**
Manufactured in **45520 VILLALUENGA DE LA SAGRA (Toledo - ESPAÑA)**

se somete por el fabricante a un control de producción en fábrica y al ensayo posterior de las muestras tomadas en la fábrica de acuerdo con un plan de ensayo preestablecido y que el organismo notificado AENOR ha llevado a cabo la inspección inicial de la fábrica y del control de producción en fábrica y que realiza el seguimiento periódico, la evaluación y la aprobación del control de producción en fábrica. Este certificado indica que se han aplicado todas las disposiciones relativas a la evaluación de la conformidad descritas en el Anexo ZA de la norma mencionada arriba y que el producto cumple todos los requisitos mínimos. Este documento faculta al fabricante para fijar el marcado CE. Este certificado es válido salvo anulación o retirada por AENOR.

is submitted by the manufacturer to a factory production control and to the further testing of samples taken at the factory in accordance with a prescribed test plan and that the notified body AENOR has performed the initial inspection of the factory and of the factory production control and performs the periodic surveillance, assessment and approval of the factory production control. This certificate attests that all provisions concerning the attestation of conformity described in Annex ZA of the above mentioned standard were applied and that the product fulfils all the minimum prescribed requirements. This document allows the manufacturer to affix the CE marking. This Certificate remains valid unless cancelled or withdrawn by AENOR.

Fecha de concesión: **2004-04-07**
Date of first issue:

Fecha de emisión: **2010-06-04**
Date of issue:

AENOR

Asociación Española de
Normalización y Certificación

Ramón NAZ PAJARES

El Director General/General Manager

No está autorizada la reproducción parcial de este documento.

The partial reproduction of this document is not permitted.

AENOR - Génova, 6 - 28004 MADRID - Teléfono 914 32 60 00 - Telefax 913 10 46 83